

TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI
FAKULTA TEXTILNÍ

METODIKA MĚŘENÍ PLOŠNÝCH DIELEKTRIK

METHODOLOGY OF MEASURING SURFACE DIELEKTRIC

Liberec 2007

Jakub Antonický

Prohlášení

Prohlašuji, že předložená diplomová práce je původní a zpracoval jsem ji samostatně. Prohlašuji, že citace použitých pramenů je úplná, že jsem v práci neporušil autorská práva (ve smyslu zákona č. 121/2000 Sb. O právu autorském a o právech souvisejících s právem autorským).

Souhlasím s umístěním diplomové práce v Univerzitní knihovně TUL.

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č.121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 (školní dílo).

Beru na vědomí, že TUL má právo na uzavření licenční smlouvy o užití mé diplomové práce a prohlašuji, že **s o u h l a s í m** s případným užitím mé diplomové práce (prodej, zapůjčení apod.).

Jsem si vědom toho, že užít své diplomové práce či poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem TUL, která má právo ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, vynaložených univerzitou na vytvoření díla (až do jejich skutečné výše).

V Liberci, dne 11. května 2007

.....
Jakub Atonický

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval Prof. Ing. Aleši Richterovi, CSc. za jeho odborné vedení a rady. Panu Drahoňovskému za precizní zpracování přídavného zařízení a pomoc při jeho návrhu. Petru Frývaldskému za pomoc při hotovení dokumentace přídavného zařízení.

Poděkování si zaslouží také má rodina, přátelé a především mé „všechno“ za psychickou podporu během procesu zrodu této diplomové práce.

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá způsobem měření dielektrických vlastností plošných textilií na přístroji Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer se zařízením 16453A pro měření dielektrických vlastností. K měření plošných textilií bylo třeba toto zařízení doplnit dalším přídatným zařízením zohledňujícím specifické vlastnosti plošných textilií. Správnost měření s tímto doplňujícím zařízením byla ověřena.

ANNOTATION

The diploma thesis deals with in a method of metering dielectric fabric properties. The apparatus Agilent E4991A RF Impedance/Material Analyzer with 16453A test fixture is applied. It was necessary to complete this arrangement with other additional attachment which makes provision for specific characteristics of fabrics. Rightness of metering was verified.

Klíčová slova: komplexní permitivita, elektrické pole, dielektrikum, plošná textilie

Key words: complex permittivity, electric field, dielectric, fabric

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Seznam použitých symbolů.....	7
1. Úvod	11
2. Dielektrické materiály v elektromagnetickém poli.....	12
2.1 Dielektrické materiály v harmonicky proměnném elektrickém poli	15
2.2 Permittivita reálných dielektrik	19
2.2 Kapacitní metoda měření komplexní permitivity.....	21
3. Elektromagnetický analyzátor Agilent E4991A	23
3.1 Zařízení 16453A pro měření dielektrických vlastností materiálů	23
3.1.1 Měření komplexní permitivity na přístroji Agilent E4991A	24
3.1.2 Chyby měření na zařízení 16453A	25
3.1.3 Kalibrace zařízení 16453A	26
4. Měření dielektrických vlastností fólií a plošných textilií	28
4.1 Přídavné zařízení pro měření fólií a plošných textilií	28
4.2 Nastavení tloušťky měřeného vzorku plošné textilie.....	30
4.3 Ověření správnosti měření s přídavným zařízením	31
4.4 Postup měření komplexní permitivity fólie nebo textilního vzorku.....	32
5. Komplexní permitivita plošných textilií	38
6. Možnosti zpracování dat z přístroje Agilent E4991A na PC.....	39
7. Závěr	42
Seznam použité literatury	43
Seznam příloh	44

Seznam použitých zkratek

2D	-dvourozměrný
3D	-trojrozměrný
APC841	-piezokeramický materiál firmy APC International
atd.	-a tak dále
č.	-číslo
jpeg	-Joint Photographic Experts Group (PC formát pro ukládání obrázků)
např.	- například
obr.	-obrázek
PC	-Personal Computer (osobní počítač)
PCM51	-piezokeramický materiál firmy Piezoceram
PES	-polyester
PMMA	-polymethylmetakrylát (plexisklo)
pozn.	-poznámka
RL	-RL obvod je obvod se sériovým zapojením odporu (R) a cívky (L)
TFT LCD	-Thin Film Transistor-Liquid Crystal Display
tj.	-to je
tzv.	-tak zvaně
VVF	-velmi vysoké frekvence

Seznam použitých symbolů

A_n	-střední hodnota
B	-magnetická indukce [T]
C	-kapacita [F]
C_0	-kapacita nehmotného prostředí, vakua [F]
C_p	-paralelní kapacita v náhradním schématu kondenzátoru [F]
\mathbf{D}	-vektor elektrické indukce [$C \cdot m^{-2}$]
D	-okamžitá hodnota elektrické indukce [$C \cdot m^{-2}$]
$\mathbf{D}(\mathbf{r})$	-vektor elektrické indukce v bodě \mathbf{r} [$C \cdot m^{-2}$]

$D(t)$	-elektrická indukce v čase t [$C \cdot m^{-2}$]
D_m	-maximální hodnota elektrické indukce v harmonicky proměnném elektrickém poli [$C \cdot m^{-2}$]
d	-průměr [m]
\mathbf{E}	-vektor intenzity skutečného elektrického pole v dielektriku [$V \cdot m^{-1}$]
E	-okamžitá hodnota intenzity elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
\mathbf{E}_0	-vektor intenzity budícího elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
\mathbf{E}'	-vektor intenzity indukovaného elektrického pole v dielektriku [$V \cdot m^{-1}$]
$\mathbf{E}(\mathbf{r})$	-vektor intenzity elektrického pole v bodě \mathbf{r} [$V \cdot m^{-1}$]
$E(t)$	-intenzita elektrického pole v čase t
E_m	-maximální intenzita harmonicky proměnného elektrického pole [$V \cdot m^{-1}$]
F	-celkový počet měření
G	-vodivost [S]
G_p	-paralelní vodivost v náhradním schématu kondenzátoru [S]
e	-Eulerovo číslo
\mathbf{j}	-jednotkový vektor
L	-indukčnost [H]
M	-střední hodnota (aritmetický průměr)
n	-číslo měření
\mathbf{P}	-vektor elektrické polarizace
$\mathbf{P}(\mathbf{r})$	-vektor elektrické polarizace v daném bodě \mathbf{r}
$P(t)$	-elektrická polarizace v čase t
\mathbf{p}_V	-dipólový moment libovolného objemu [C.m]
P_{Eztr}	-ztrátový výkon [W]
Q	-celkový elektrický náboj [C]
R	-odpor [Ω]
R_p	-paralelní odpor v náhradním schématu kondenzátoru [Ω]
S_n	-naměřená hodnota při n -tém měření
\mathbf{r}	-polohový vektor [m]
S	-plocha [m^2]
t	-tloušťka [m]
U	-napětí [V]
U_0	-napětí mezi elektrodami v nehmotném prostředí, vákuu [V]
U_m	-maximální amplituda napětí elektrického pole [V]

V	-objem [m^3]
w_{Estr}	-hustota ztrátové energie v dielektriku za jednu periodu budícího elektrického pole [$\text{J} \cdot \text{m}^{-3}$]
W_{Es}	-střední hodnota elektrické energie v dielektriku za jednu periodu budícího elektrického pole [J]
W_{Eres}	-reálná složka střední hodnoty elektrické energie v dielektriku za jednu periodu budícího elektrického pole [J]
W_{Eims}	-imaginární složka střední hodnoty elektrické energie v dielektriku za jednu periodu budícího elektrického pole [J]
X	-reaktance [Ω]
Y	-admittance [S]
Y^*	-komplexní admittance [S]
Z	-impedance [Ω]
α	-polarizovatelnost
Γ	-reflexní koeficient [-]
δ	-ztrátový úhel [rad]
ε	-absolutní permitivita [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
$\varepsilon(\omega)$	-permitivita při úhlové frekvenci ω [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_0	-permitivita vakua [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_r	-relativní permitivita [-]
ε_r^*	-relativní komplexní permitivita [-]
ε_s	-statická permitivita [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_∞	-permitivita při frekvenci blížící se nekonečnu [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε'	-reálná složka komplexní permitivity [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_r'	-reálná složka relativní komplexní permitivity [-]
ε''	-imaginární složka komplexní permitivity [$\text{F} \cdot \text{m}^{-1}$]
ε_r''	-imaginární složka relativní komplexní permitivity [-]
θ	-zátěžový úhel [rad]
μ_r	-relativní permeabilita [-]
μ_r'	-reálná složka relativní komplexní permeability [-]
μ_r''	-reálná složka relativní komplexní permeability [-]
π	-Rudolfovo číslo
τ	-časová konstanta [s]
φ	-fázový posuv [rad]

χ_e	-elektrická susceptibilita [-]
χ'	- reálná složka komplexní susceptibility [-]
χ''	-imaginární složka komplexní susceptibility [-]
ω	-úhlová frekvence [rad.s ⁻¹]

1. Úvod

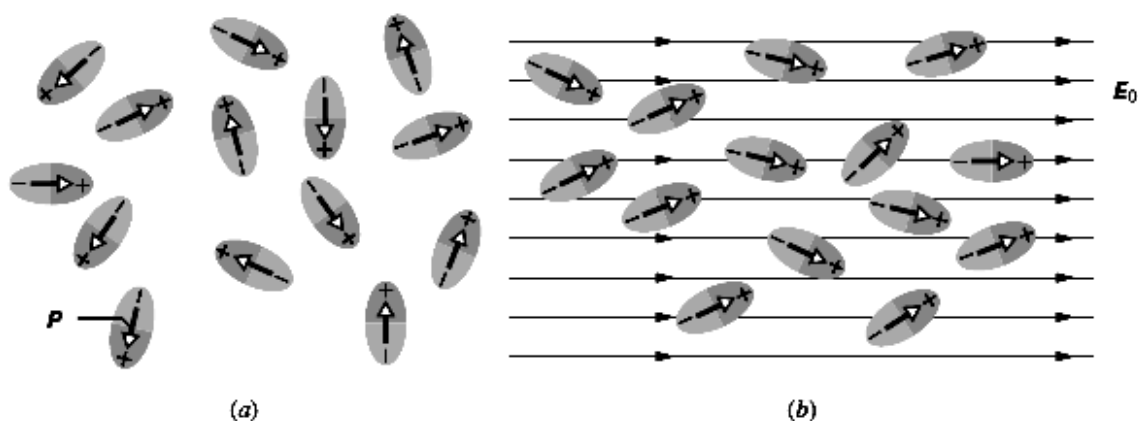
V současné době mnoho technických aplikací využívá elektromagnetického vlnění. Příkladem může být mikrovlnný ohřev vody, nebo přenos informací, ke kterému je používán modulovaný elektromagnetický signál. Např. síť mobilních operátorů pracují v mikrovlnné oblasti. Elektromagnetické vlnění je tedy všude kolem nás, a proto je užitečné znát elektrické vlastnosti materiálů, jejich permitivitu.

Permitivita je fyzikální veličina, která popisuje vlastnosti dielektrického materiálu vystaveného působení elektrického nebo elektromagnetického pole. Pokud je materiál vystaven elektrickému poli, dielektrikum se polarizuje. Tj. ukládá se do něj elektrický náboj, energie. Permitivita vyjadřuje schopnost materiálu vázat tuto energii. V případě, že je materiál vystaven střídavému harmonickému elektrickému poli nebo elektromagnetickému vlnění, popisuje vztah mezi vektory intenzity elektrického pole a elektrické indukce. Potom je permitivita vyjádřena komplexním číslem. Tzn., že permitivita má dvě složky. Reálnou a imaginární. Reálná složka komplexní permitivity popisuje schopnost polarizace dielektrického materiálu, množství uložené elektrické energie. Složka imaginární oproti tomu vyjadřuje neochotu materiálu se polarizovat, jeho vnitřní odpor bránící polarizaci. Při překonávání tohoto odporu je spotřebovávána část energie elektrického pole. Ta, jak víme ze zákona zachování energie, se neztratí, ale je přeměněna na energii tepelnou.

Přístroj, měřící permitivitu, který je k dispozici, je určen pro měření tuhých homogenních materiálů. To plošné textilie nejsou. Proto je toto zařízení třeba doplnit přípravkem, který tyto vlastnosti zohlední, a ověřit, zda výsledky měření při použití tohoto zařízení jsou správné.

2. Dielektrické materiály v elektromagnetickém poli

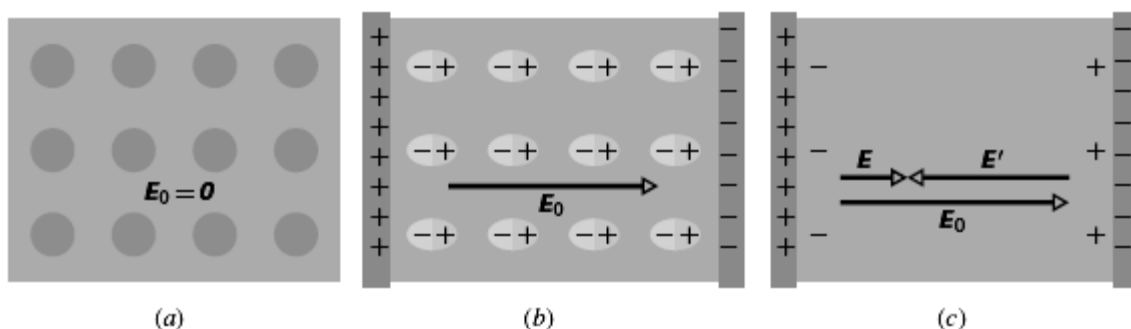
1. Polární dielektrika – u těchto dielektrik mají molekuly permanentní elektrické dipólové momenty. Takovýmto dielektrikem je např. voda. Jestliže existuje vnější elektrické pole, tyto dipóly se natačejí do jeho směru, obr.2.1. Protože se však molekuly neustále pohybují a narážejí do sebe, v důsledku jejich nahodilého tepelného pohybu, není jejich uspořádání úplné. Orientace je tím úplnější, čím je vyšší intenzita vnějšího elektrického pole a teplota dielektrika, tedy i nižší intenzita srážek. Natočením molekul vzniká elektrické pole, které má opačný směr a nižší intenzitu než pole vnější [1].



Obr. 2.1 Orientace molekul s permanentním dipólovým momentem nepůsobí-li vnější elektrické pole (a), působí-li vnější elektrické pole [1].

2. Nepochární dielektrika – nezávisle na tom, zda jejich molekuly mají nebo nemají permanentní dipólové momenty, tak pokud na ně působí vnější elektrické pole, získávají indukované dipólové momenty. Vnější pole se projeví protažením molekuly, oddálením středů oblastí kladného a záporného náboje. Ve srovnání s vlastními dipóly jsou tyto indukované dipóly o několik řádů nižší ($\approx 10^{-35}$ C.m). K významnějším deformacím atomů a molekul dochází až ve velmi silných elektrických polích.

Na obr. 2.2a vidíme znázorněnou desku z nepolárního dielektrika. Na obr. 2.2b na ni působí vnější elektrické pole \mathbf{E}_0 . Jeho vlivem dojde k vytvoření indukovaných dipólů, a tím ke vzniku kladného povrchového náboje na jedné straně desky a záporného na druhé. Následkem toho dojde ke vzniku vnitřního elektrického pole \mathbf{E}' , jehož intenzita je nižší a orientace opačná než vnějšího pole \mathbf{E}_0 , a k zeslabení intenzity vnějšího pole na intenzitu \mathbf{E} , obr. 2.2c [1].



Obr. 2.2 schéma polarizace nepolárního dielektrika [1].

Jedinou charakteristikou pro popis tohoto jevu je vektor elektrické polarizace $\mathbf{P}(\mathbf{r})$, který má význam objemové hustoty dipólového momentu v daném bodě \mathbf{r} . Experimentálně pozorovaný výsledný dipólový moment libovolného objemu V dielektrika pak můžeme vyjádřit vztahem:

$$\mathbf{p}_V = \int_V \mathbf{P}(\mathbf{r}) dV. \quad (2.1)$$

Ten můžeme považovat za definici polarizace[2].

Pro další sledování obecných vlastností elektrostatického pole v dielektriku budeme předpokládat idealizovaný model spojitého prostředí, jehož elektrické vlastnosti jsou zcela popsány vektorem polarizace $\mathbf{P}(\mathbf{r})$. Pro elektrické pole pak platí Gaussův zákon ve tvaru:

$$\oint_S \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = Q, \quad (2.2)$$

kde \mathbf{D} je vektor elektrické indukce definovaný vztahem:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \epsilon_0 \cdot \mathbf{E}(\mathbf{r}) + \mathbf{P}(\mathbf{r}). \quad (2.3)$$

Kde ϵ_0 je fyzikální konstanta zvaná permitivita vakua a její hodnota činí $8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$.

Elektrostatické pole je v dielektriku tedy popsáno dvěma vektorovými funkcemi $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ a $\mathbf{D}(\mathbf{r})$. Pro jejich určení zavádíme vztah, který je závislý na vlastnostech konkrétního dielektrika. Vyplyvá z definice vektoru elektrické indukce (2.3.), pokud je udána souvislost

vektorového pole $\mathbf{P}(\mathbf{r})$ s intenzitou $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ v dielektriku. Proto ji nazýváme materiálovým vztahem. V případě ideálně měkkého dielektrika (předpokládáme lineární závislost vektoru polarizace \mathbf{P} v daném bodě na výsledné intenzitě pole \mathbf{E} v tomto bodě. Pro izotropní a homogenní prostředí můžeme tuto závislost zapsat ve tvaru:

$$\mathbf{P}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 \chi_e \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (2.4)$$

χ_e je elektrická susceptibilita, bezrozměrná veličina charakterizující vlastnosti dielektrika. Tato veličina je vždy kladná. Použijeme-li vztahu mezi relativní permitivitou a susceptibilitou:

$$\varepsilon_r = 1 + \chi_e, \quad (2.5)$$

vztahu (2.3.) a (2.4.), můžeme napsat vztah pro vektor elektrické indukce:

$$\mathbf{D}(\mathbf{r}) = \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (2.6)$$

Veličina:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \varepsilon_r, \quad (2.7)$$

se nazývá permitivitou daného dielektrika a má stejnou jednotku jako permitivita vakua, tedy F.m^{-1} . ε_r relativní permitivita daného dielektrika a platí pro ni vztah:

$$\varepsilon_r = \frac{U_0}{U} = \frac{C}{C_0}. \quad (2.8)$$

Kde U_0 je napětí na elektrodách kondenzátoru před a U po vložení dielektrika. Obdobně C_0 , C kapacita kondenzátoru před a po vložení dielektrika. Relativní permitivita nám udává kolikrát je permitivita daného dielektrika ε větší než permitivita vakua ε_0 [2].

2.1 Dielektrické materiály v harmonicky proměnném elektrickém poli

Dosud jsme předpokládali, že elektrické pole, kterému je dielektrikum vystaveno, je statické. Vektor intenzity se nám s časem nemění. Podívejme se, jak to bude vypadat bude-li na dielektrikum působit pole nestatické s harmonickým průběhem.

Předpokládáme-li, že materiál je vystaven elektrickému poli s harmonickým průběhem, potom můžeme fázor budícího elektrického pole vyjádřit vzorcem:

$$\mathbf{E} = |E|e^{j\omega t}. \quad (2.9)$$

Vlivem tohoto pole se bude dielektrický materiál polarizovat. Budeme-li předpokládat dielektrikum lineární, pak výsledná polarizace bude též harmonická. Dipóly se však nestihají natáčet současně s budícím elektrickým polem. Nastává určité časové zpoždění mezi polohou dipólu a budícího elektrického pole:

$$\mathbf{P} = |P|e^{j(\omega t + \delta)}. \quad (2.10)$$

Jestliže uvažujeme mezi fázory budícího elektrického pole \mathbf{E} a polarizací \mathbf{P} fázový posun,

$$\mathbf{P} = \chi \mathbf{E} \quad \text{a} \quad \mathbf{D} = \epsilon \mathbf{E}, \quad (2.11 \text{ a,b})$$

pak je zřejmé, že materiálové konstanty permitivity a susceptibilita jsou komplexními čísly.

$$\chi = \chi' - j\chi'' \quad \text{a} \quad \epsilon = \epsilon' + j\epsilon''. \quad (2.12)$$

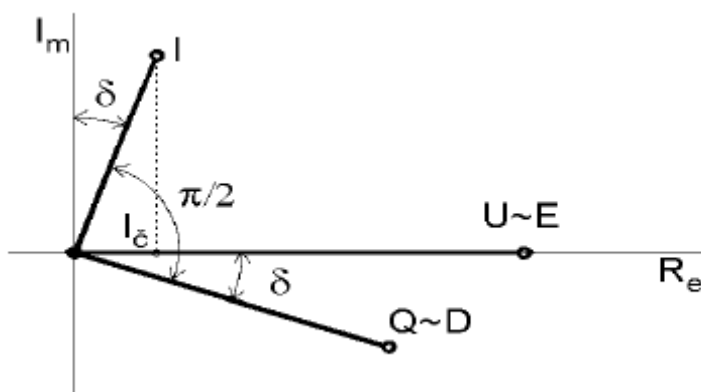
Poměr jednotlivých složek permitivity je pak tangentou ztrátového úhlu:

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (2.13)$$

Kdybychom měli ideální, bezztrátové, dielektrikum, byl by ztrátový úhel roven nule. Permitivita takového dielektrika by neobsahovala imaginární složku. Kondenzátor

se ztrátovým dielektrikem však není ideální. Fázový posuv kondenzátoru není roven 90° . Ten je menší právě o ztrátový úhel:

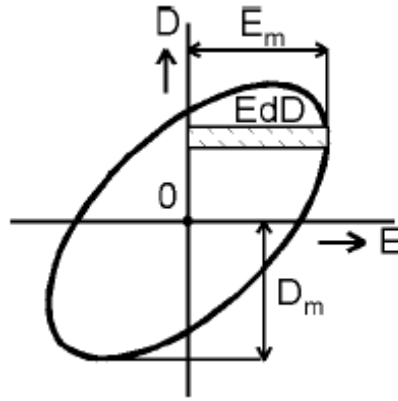
$$\varphi = 90^\circ - \delta. \quad (2.14)$$



Obr. 2.3 Fázový diagram ztrátového dielektrika [3].

Mezi fázory \mathbf{E} a \mathbf{D} existují podobné vztahy jako mezi proudem a napětím v RL obvodech. Bude-li dielektrikum lineární, jeho permitivita obsahovat lineární složku (mezi intenzitou budícího elektrického pole elektrickou indukci je fázový posuv) a budící elektrické pole malé, pak okamžité hodnoty E a D zanesené do grafu vykreslí elipsu. Plocha této elipsy se rovná hustotě tepelných ztrát za dobu jedné periody budícího elektrického pole. Plochu elipsy můžeme rozložit na elementy o velikosti součinů okamžité hodnoty E a přírůstku elektrické indukce dD .

$$S_{elipsy} = \oint_{C_{elipsy}} \mathbf{E} \cdot d\mathbf{D} = w_{Eztr}. \quad (2.15)$$



Obr. 2.4 Vztah mezi okamžitými hodnotami E a D u ztrátového dielektrika [3].

Dipóly při polarizaci elektrickým polem překonávají odpor. Proto se nestíhají naklápět současně s budícím polem a dochází k fázovému posuvu mezi fázory \mathbf{E} a \mathbf{P} . K překonání odporu je zapotřebí energie, která je odebírána z udičího elektrického pole. Pro elektrickou energii v dielektriku, vystavenému harmonicky proměnnému elektrickému poli, platí:

$$W_{Es} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \cdot \epsilon \cdot \int E_m^2 \cdot dV \right) = \frac{1}{4} (\epsilon' - j\epsilon'') \cdot U_m^2 \cdot \frac{S}{l} = W_{Eres} - jW_{Eims} \quad (2.16)$$

Kde: E_m , U_m – jsou maximální amplitudy budícího pole a napětí. W_{Es} , W_{Eres} , W_{Eims} – střední hodnoty energií za jednu periodu.

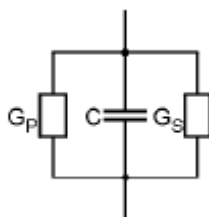
Z uvedeného vztahu vidíme, že v dielektriku se objevují dvě formy energie. Energie akumulovaná v dielektriku, kterou vyjadřuje reálná složka W_{Eres} , a energie spotřebovaná na polarizaci vnitřní struktury. Ta je zastoupena imaginární složkou W_{Eims} . Vyjadřuje tepelné ztráty vzniklé vnitřním třením při natáčení dipólů v dielektriku. Pro ztrátový výkon pak platí:

$$P_{Eztr} = \frac{V \cdot w_{Eztr}}{T} = V \cdot w_{Eztr} \cdot f = W_{Eims} \cdot f \quad (2.17)$$

V náhradním paralelním schématu uvažujeme dvě vodivosti. Nenulový svod izolantu, ten se uplatňuje vždy i při stejnosměrném napájení. Druhá vodivost nahrazuje ekvivalentní polarizační ztráty. Celkový zdánlivý výkon pak lze vyjádřit výrazem:

$$\mathbf{S} = U_{ef}^2 \cdot (G_s + j\omega C + G_p), \quad (2.18)$$

$$U_{ef}^2 \cdot G_P = P_{Eztr} . \quad (2.19)$$



Obr. 2.5 Náhradní schéma kondenzátoru se ztrátovým dielektrikem [3].

Ztrátový úhel můžeme vyjádřit:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{G_P}{\omega \cdot C_P} . \quad (2.20)$$

Z tohoto vztahu již snadno získáme imaginární složku permitivity, pro případ deskového kondenzátoru [3]

$$\varepsilon'' = \frac{G_P \cdot l}{\omega \cdot S} . \quad (2.21)$$

Polarizace materiálu není schopna sledovat rychlé změny budícího pole. Můžeme očekávat, že s rostoucí frekvencí bude fázový posuv mezi vstupním polem a polarizací narůstat.

Změní-li se skokem vstupní pole, polarizace se ustaluje exponenciálně [4]

$$P(t) = P_{\infty} \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) . \quad (2.22)$$

Tento vztah je možné považovat za řešení diferenciální rovnice:

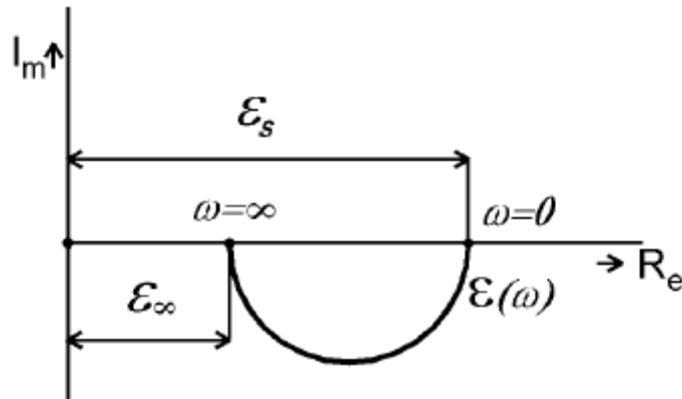
$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P_{\infty} - P(t)}{\tau} \text{ s počáteční podmínkou } P(0)=0. \quad (2.23)$$

Kde τ je časová konstanta označovaná jako doba relaxace. Jestliže je budící elektrické pole proměnné, pak v každém časovém okamžiku musí k hodnotě $E(t)$ náležet určitá hodnota polarizace $P(t)$ případně indukce $D(t)$. Permittivita se bude s rostoucí frekvencí měnit, proto máme definovanou permitivitu statickou ϵ_s (frekvence nulová) a při frekvenci blížící se nekonečnu ϵ_∞ . Potom:

$$P(t) = \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{4\pi} E(t). \quad (2.24)$$

Dosadíme-li rovnice (2.9) a (2.24) do rovnice (2.23) a po jejich vyřešení do (2.11b) získáme komplexní permitivitu [3].

$$\epsilon = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + j\omega\tau}, \quad \epsilon' = \epsilon_\infty + \frac{\epsilon_s - \epsilon_\infty}{1 + \omega^2\tau^2}, \quad \epsilon'' = (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \cdot \frac{\omega\tau}{1 + \omega^2\tau^2}. \quad (2.25a,b,c)$$



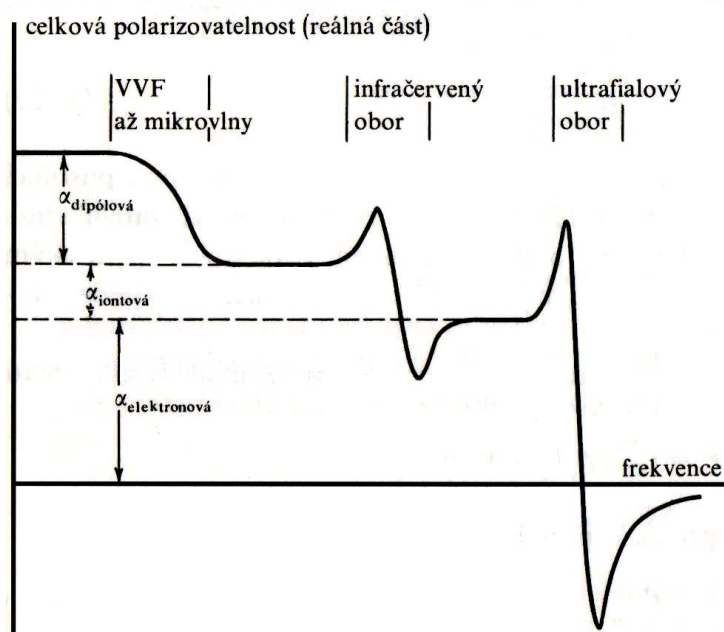
Obr. 2.6 Závislost komplexní permitivity na kmitočtu [3].

Tato závislost je pouze teoretická. Reálná dielektrika se chovají jinak.

2.2 Permittivita reálných dielektrik

Celková polarizace dielektrika se skládá z několika typů. A to polarizace dipólové iontové a elektronové. S rostoucí frekvencí se některé druhy polarizace přestávají uplatňovat. Závislost jednotlivých příspěvků na celkové polarizovanosti dielektrika na frekvenci je

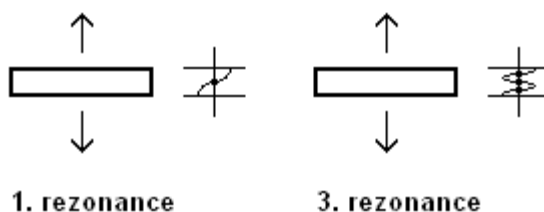
znázorněna na obr. 2.7. To, že se přestane uplatňovat některý druh polarizace se projeví skokovou změnou permitivity, které říkáme fázový přechod.



Obr. 2.7 Frekvenční závislost jednotlivých příspěvků polarizovatelnosti [4].

Závislost permitivity reálných dielektrik na frekvenci je znázorněna na grafu 1a, b a grafu 2a, b v příloze č.1. Jedná se o frekvenční závislost komplexní permitivity ve frekvenčním pásmu od 1 MHz do 3 GHz piezokeramiky APC841 a PCM51. Dielektrické vlastnosti těchto piezokeramik udávané výrobcem jsou uvedeny v tab. 2.1.

Všimněme si tzv. rezonančních frekvencí. Rezonanční frekvence je závislá na tloušťce měřeného vzorku a projeví se náhlým nárůstem a následně poklesem permitivity. K tomu dojde v případě, že tloušťka vzorku je 0,5; 1,5; 2,5; ... násobkem délky vlny budícího harmonicky proměnného elektrického pole nebo elektromagnetického vlnění, tzn. projeví se pouze rezonance lichých řádů, obr.2.8. Přitom výkyv permitivity je s rostoucím řádem rezonance menší.



Obr. 2.8 Rezonanční frekvence.

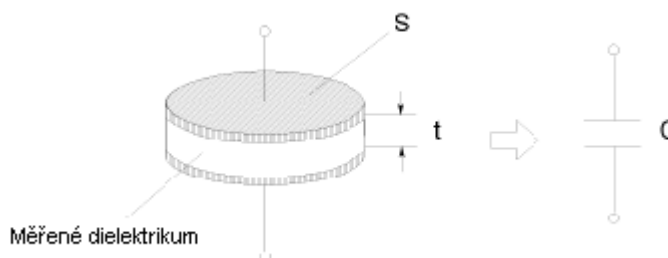
V oblasti frekvenčního spektra kolem 1 GHz je vidět fázový přechod, kdy se přestává uplatňovat dipólová polarizace. To je provázáno poklesem permitivity.

	APC841	PCM51
Výrobce	APC International	Piezoceram
Typ	Tvrdá piezokeramika	Měkká piezokeramika
Relativní dielektrická konstanta ϵ_r' [-]	1350	1850
Dielektrický ztrátový faktor $\tan\delta$ [%]	0,35	1,9

Tab. 2.1 Dielektrické vlastnosti udávané výrobcem [6], [7].

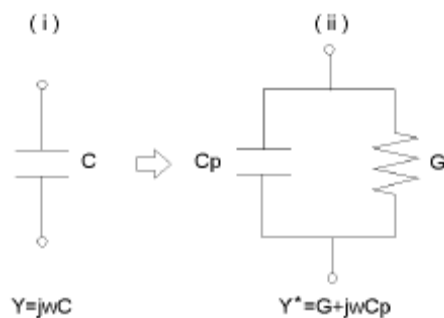
2.2 Kapacitní metoda měření komplexní permitivity

U kapacitní metody se k výpočtu komplexní permitivity používá hodnoty kapacity změřené mezi elektrodami přístroje. Jako dielektrikum slouží testovaný vzorek, obr. 2.9. Plošné rozměry měřeného vzorku materiálu musí být větší než plocha elektrod a jeho tloušťka řádově nižší.



Obr. 2.9 Kapacitní metoda měření komplexní permitivity [8].

Zařízení, na kterém se touto metodou měří, musí mít vysokou impedanci. Kapacita vytvořeného kondenzátoru pak bude velmi malá a jeho náhradní schéma se skládá z paralelní ekvivalentní kapacity C_p a paralelní ekvivalentní vodivosti G obr. 2.10.



Obr. 2.10 Náhradní schéma kondenzátoru pro výpočet komplexní permitivity [8].

Pro admitanci u elektrického obvodu (i) na obr. 2.10 platí vztah:

$$Y = j\omega C = j\omega \left| \varepsilon_r^* \right| C_0. \quad (2.26)$$

Pro admitanci elektrického obvodu (ii) na obr. 2.10 pak vztah:

$$Y^* = G + j\omega C_p = j\omega \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G_p}{\omega C_0} \right) C_0. \quad (2.27)$$

Kapacita C_0 je kapacita změřená v případě, že dielektrikum mezi elektrodami je vzduch.

Vyjdeme-li z těchto vztahů, pak relativní komplexní permitivitu ε_r^* , reálnou ε_r' a imaginární ε_r'' složku permitivity vypočteme ze vztahů [8]:

$$\varepsilon_r^* = \left(\frac{C_p}{C_0} - j \frac{G_p}{\omega C_0} \right), \quad (2.28)$$

$$\varepsilon_r' = \frac{C_p}{C_0} = \frac{t C_p}{\varepsilon_0 S}, \quad (2.29)$$

$$\varepsilon_r'' = \frac{G}{\omega C_0} = \frac{t}{\omega \varepsilon_0 S R_p} \quad \left(G \rightarrow \frac{1}{R_p} \right). \quad (2.30)$$

3. Elektromagnetický analyzátor Agilent E4991A

Elektromagnetický analyzátor Agilent E4991A je určen pro měření impedance, dielektrických a magnetických vlastností materiálů ve frekvenčním pásmu 1MHz – 3GHz s maximálním rozlišením 1mHz. Maximální počet bodů rozmítání měření je 801. Přehled veličin které lze na tomto zařízení měřit je uvedeno v tab. 3.1.

Impedance	$ Z , \theta_Z, Y , \theta_Y, R, X, G, B, C_S, C_P, L_S, L_P, R_P, R_S, D, Q, \Gamma, \theta_\Gamma, \Gamma_X, \Gamma_Y$
Dielektrické vlastnosti materiálů	$ \epsilon_r , \epsilon_r', \epsilon_r'', \tan\delta$
Magnetické vlastnosti materiálů	$ \mu_r , \mu_r', \mu_r'', \theta$

Tab.3.1 Přehled veličin, které měří přístroj Agilent E4991A.

Tento přístroj má grafické uživatelské rozhraní vystavěné na bázi operačního systému Microsoft Windows 2000, takže jeho ovládání je velmi snadné. Pro snadnější ovládání lze připojit myš a klávesnici. Jako grafický výstup slouží 8,4" TFT LCD displej, umístěný na jeho čelním panelu. Na tomto displeji jsou zobrazovány výsledky měření ve formě grafů.

3.1 Zařízení 16453A pro měření dielektrických vlastností materiálů

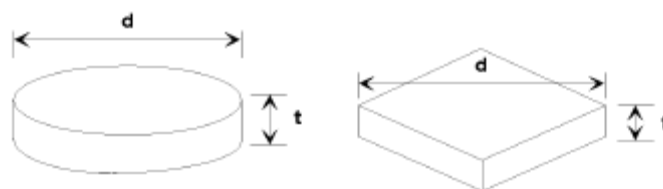
Zařízení 16453A (obr. 3.2) je příslušenství k přístroji Agilent E4991A RF sloužící k upínání vzorků dielektrických materiálů pro měření jejich dielektrických vlastností v pásmu 1 MHz – 1 GHz (absolutní relativní permitivity $|\epsilon_r|$, reálné ϵ_r' a imaginární ϵ_r'' složky komplexní relativní permitivity, jejich poměru tangenty ztrátového úhlu $\tan\delta$).

Frekvence: 1 MHz - 1 GHz

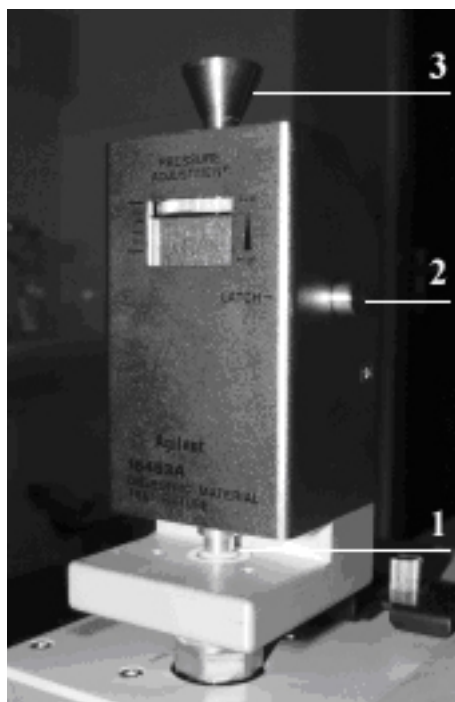
Maximální napětí: ± 40 V saturační (AC+DC)

Teplota: -55°C do 200°C

Velikost vzorku materiálů: $d \geq 15$ mm, $0,3 \leq t \leq 3$ mm Obr.3.1



Obr. 3.1 Parametry vzorku [8].

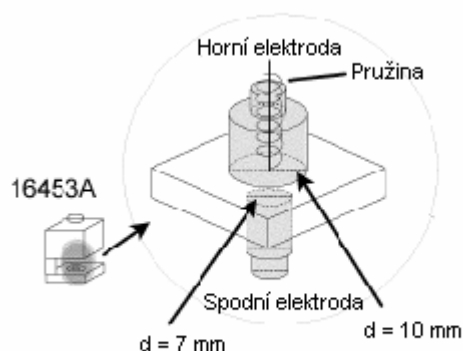


Obr. 3.2 Zařízení 16453A pro měření dielektrických vlastností materiálů.

Mezi horní a dolní elektrodu (1) se vkládá měřený vzorek dielektrického materiálu. Regulační šroub (2) slouží k nastavení přtlaku horní elektrody pro správné sevření měřeného vzorku. Kuželovitý knoflík (3) slouží ke zvedání horní elektrody. Západkou (4) je možné horní elektrodu zaaretovat ve zdvižené poloze, což se používá při kalibraci naprázdno.

3.1.1 Měření komplexní permitivity na přístroji Agilent E4991A

Tento přístroj, dovybavený zařízením 16453A, měří komplexní permitivitu kapacitní metodou, kapitola 2.2. Kondenzátor vytváříme vložením měřeného vzorku mezi elektrody upínače 16453A obr. 3.3.



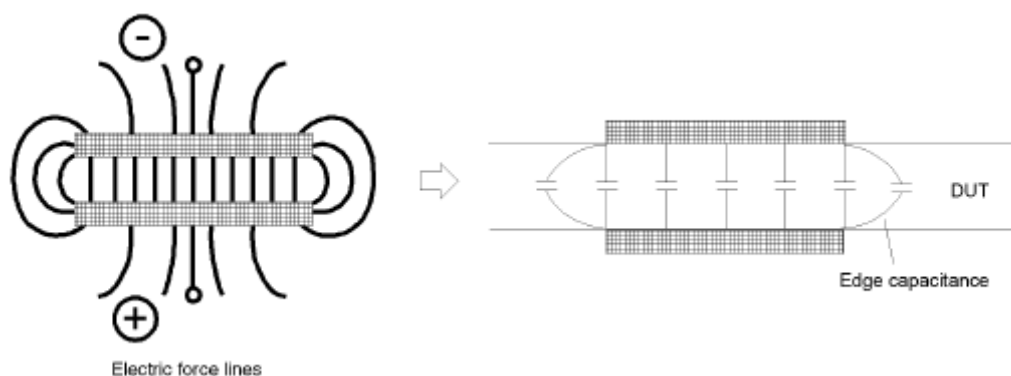
Obr. 3.3 Elektrody upínače 16453A [8].

Jako plocha elektrody S je brána plocha spodní elektrody upínače.

3.1.2 Chyby měření na zařízení 16453A

Okrajová kapacita

Na obr. 3.4 je znázorněno elektrické pole kolem elektrod upínače při měření kapacity dielektrika. Jak je z tohoto obrázku zřejmé, při měření je změřena i kapacita vně elektrod. Změřená kapacita je tedy větší, než jaká skutečně je. Při měření se zařízením 16453A je s touto chybou počítáno, a proto je třeba, aby plošné rozměry testovaného vzorku byly větší než elektrod zařízení 16453A.



Obr. 3.4 Výskyt okrajové kapacity [8].

Stálé nepřiraditelné chyby zařízení 16453A

Zařízením 16453A vznikají při měření chyby způsobené kolísáním frekvence a fázovým posuvem harmonického buzení, zbytkovou impedancí a parazitní admitancí zařízení. Tyto chyby eliminujeme provedením kalibrace.

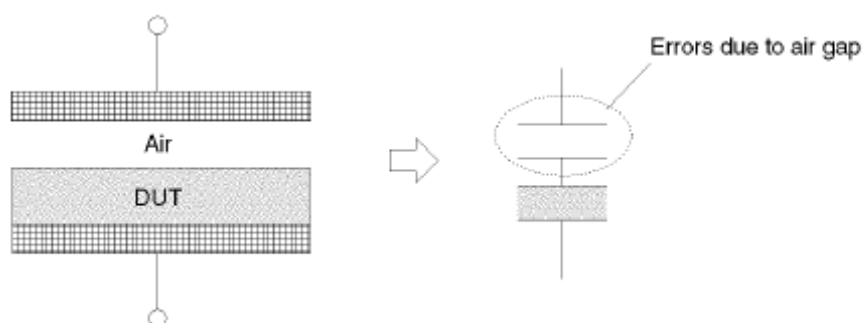
Vzduchová mezera

Vznikne-li mezi elektrodou upínače a měřeným vzorkem dielektrika vzduchová mezera, je kromě kapacity měřeného vzorku změřena též kapacita vzduchové mezery, obr.3.5.

Při sériovém zapojení kondenzátorů platí vztah:

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2}, \quad (3.1)$$

a proto je změřená kapacita a tedy i reálná složka permitivity menší. Proto je třeba dbát, aby byl vzorek mezi elektrodami dobře upnut, např. zvýšením přitlaku elektrod.

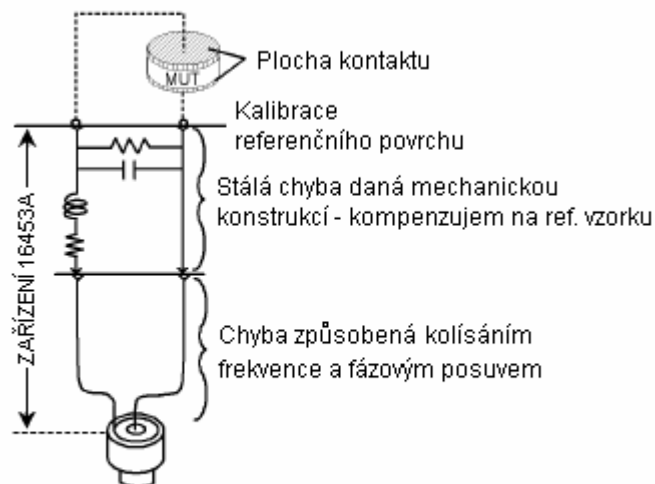


Obr. 3.5 Vzduchová mezera.

3.1.3 Kalibrace zařízení 16453A

Pro eliminování stálých nepřiraditelných chyb zařízení 16453A a chyb způsobených frekvencí elektrického buzení provádíme jeho kalibraci. Kalibrace je provedena použitím MUT propojovací roviny zařízení 16453A jako kalibrace základní roviny obr. 3.6. Změří se hodnoty permitivity a upraví se výpočty podle kalibrační tabulky, známých, korektních hodnot permitivity pro jednotlivé frekvence. Kalibrace se provádí nakrátko - elektrody se

dotýkají, otevřená - dielektrikum je vzduch mezi spodní a horní zaaretovanou elektrodou a se zátěží - použijeme nám známé dielektrikum. V našem případě je to teflonová destička o tloušťce $t = 0,8$ mm, dodávaná se zařízením A16453A.



Obr. 3.6 Model chyby zařízení 16453A [8].

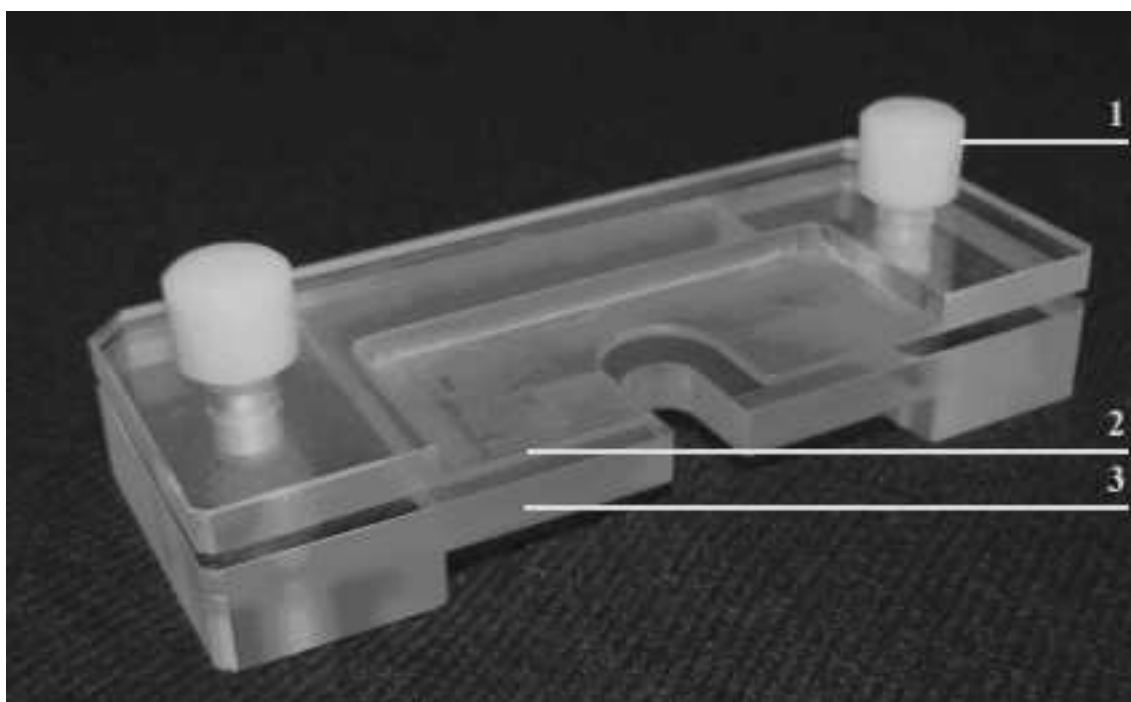
Chyby vzniklé rozptylem elektrického pole kolem elektrod, kompenzovat kalibrací nelze. Čím bude vzorek tlustší, a tedy elektrody vzdálenější, bude elektrické pole více rozptýlené. Proto chyba měření, která je vždy záporná, bude narůstat s tloušťkou vzorku. Přesnějšího měření dosáhneme na tenkých vzorcích kde bude elektrické pole více nahuštěné.

4. Měření dielektrických vlastností fólií a plošných textilií

4.1 Přídavné zařízení pro měření fólií a plošných textilií

Zařízení 16453A je určeno pro měření tuhých homogenních materiálů. Aby bylo možné na tomto přístroji měřit folie a plošné textilie, bylo třeba zhotovit přídavná zařízení. Při návrhu těchto zařízení byl brán zřetel na specifické vlastnosti fólií a plošných textilií.

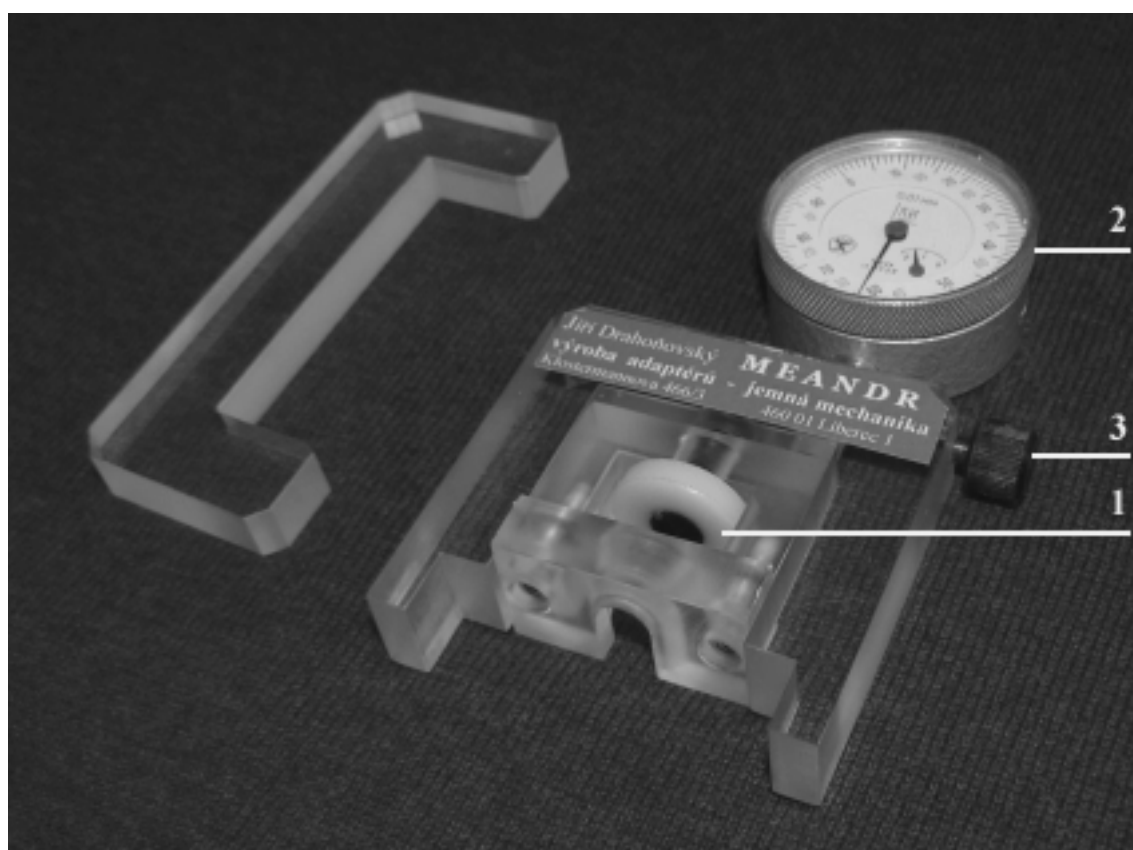
Především je to jejich vysoká ohebnost (splývavost). Fólie a plošné textilie se ohýbají již tíhou vlastní hmotnosti. K vyřešení tohoto problému stačí jednoduchý upínací rámeček, obr. 4.1, do kterého se měřený vzorek upne. Rámeček tak zajistí rovinný tvar měřeného vzorku a jeho kolmou polohu k osám elektrod. Upínací šrouby (1), slouží k přitažení horní desky rámečku (2) ke spodní (3), mezi které se vkládá měřený vzorek. Rámeček s upnutým vzorkem se nasune na upínač 16453A tak, aby byl testovaný vzorek mezi elektrodami obr. 4.3.



Obr. 4.1 Rámeček na uchycení vzorku fólie nebo plošné textilie.

Druhou vlastností, kterou je třeba zohlednit, a to především u plošných textilií, je jejich snadná stlačitelnost. Horní elektroda upínače 16453A je ke spodní elektrodě

přítlačována pružinou, aby byl měřený vzorek mezi nimi pevně sevřen. V případě měření plošné textilie, na nepřizpůsobeném upínači, dojde k jejímu zmáčknutí. Zmáčknutí má za následek změnu její struktury a geometrických vlastností v měřeném místě. Změní se nám její tloušťka, uspořádání nití ve vzorku a zvýší se její zaplnění, bude obsahovat menší množství vzduchu. Tím se změní naměřené hodnoty permitivity. Více v kapitole 4.2. Kromě toho, by bylo problematické zjistit vzdálenost elektrod upínače, kterou je nutno zadat při měření přístroji, který s ní kalkuluje při výpočtu kapacity. Proto je třeba zajistit polohu horní elektrody upínače 16453A v požadované vzdálenosti od elektrody horní a tím vlastně nastavit tloušťku měřeného vzorku. K tomu slouží zařízení na obr. 4.2. Díl A se nasune na horní část upínače 16453A a zajistí dílem B, obr. 4.3. Regulační šroub (1) slouží k regulaci výšky horní elektrody. Její vzdálenost od elektrody spodní, nastavovanou tloušťku, odečítáme ze stupnice úchylkoměru (2). Úchylkoměr je k zařízení upevněn šroubem (3) Před měřením je třeba zkontrolovat, zda je stupnice úchylkoměru, pro dotýkající se elektrody, nastavena na nulu.



Obr. 4.2 Přídavné zařízení zajišťující polohu horní elektrody zařízení 16453A.

Obě zařízení jsou vyrobená z nevodivých materiálů, aby co nejméně změnili admitanci a elektrické pole upínače 16453A. Jako základní konstrukční materiál byl zvolen PMMA

(plexisklo). Upínací šrouby rámečku a šroub regulující výšku horní elektrody jsou z PES (polyester). Z konstrukčních důvodu bylo nutno při výrobě druhého přípravku použít dvou kovových šroubů. Též úchylkoměr, měřící vzdálenost elektrod u druhého přípravku, je kovový.



Obr. 4.3 Přídavná zařízení nainstalovaná na zařízení 16453A.

Dokumentace k těmto přídavným zařízením je přiložena v příloze (Příloha č.2).

4.2 Nastavení tloušťky měřeného vzorku plošné textilie

V předešlé kapitole bylo uvedeno, že plošná textilie je materiál měkký, a že její zmáčknutí má za následek změnu její struktury, geometrických vlastností a zaplnění (obsah vzduchu ve struktuře textilie). Provedeme-li pokus, kde u stejné plošné textilie změříme komplexní permitivitu při rozdílném nastavení její tloušťky a hodnoty jednotlivých měření zobrazíme do jednoho grafu, graf 3a, b příloha č.1, vidíme, že hodnoty permitivity převážně

její reálné složky liší. To znamená, že změny vlastností plošné textilie se odrazí i na jejích dielektrických vlastnostech. Největší podíl na změně hodnot permitivity bude mít zaplnění textilie, obsah vzduchu v jejím objemu.

Nastává problém jakou tloušťku textilie pro měření zvolit. Pojem tloušťka textilie je problematika dosti složitá. Co je textilie a co už je chlupatost? Tou se však nebudeme zabývat a podržíme se klasického postupu pro stanovení tloušťky textilií. To se provádí tak, že se změří její tloušťka při daném plošném zatížení [9]. Plošné zatížení nám předepisuje norma a je pro různé typy textilií stanoveno odlišné. Toto měření se provádí na tloušťkoměrech. Tím zabezpečíme podobné podmínky při měření různých textilií.

4.3 Ověření správnosti měření s přídavným zařízením

Pro ověření zda přístroj i s přídavným zařízením měří správně, jsem použil vzorku nám již známé piezokeramiky APC 841. Jeho vlastnosti udávané výrobcem jsou v tabulce tab. 2.1. Měření jsem prováděl dvakrát nejprve bez přídavného zařízení a poté s ním. Každé toto měření jsem provedl na třech místech vzorku a výsledky poté zprůměřňoval. Výsledky obou měření jsem pro názornost zobrazil do jednoho grafu, graf 4a, b příloha č.4. Podmínky měření a parametry vzorku byly u obou měření stejné a jsou uvedeny v tab. 4.1.

Materiál vzorku	Piezokeramika APC 841
Tloušťka vzorku	1,75 mm
Velikost vzorku	Kolečko o průměru $d = 28$ mm
Max. amplituda buzení	$U_{max} = 100\text{mV}$

Tab. 4.1 Podmínky měření.

Podíváme-li se na grafy, vidíme že v oblasti frekvencí nad 1GHz dochází k fázovému posuvu. U nižších frekvencí se hodnoty shodují. Lze tedy s tímto přípravkem komplexní permitivitu do 1GHz měřit. Zařízení 16453A, pro měření dielektrických vlastností, je stejně konstruováno na měření komplexní permitivity pouze do této frekvence.

4.4 Postup měření komplexní permitivity fólie nebo textilního vzorku

V této kapitole je uveden základní postup jak změřit na přístroji Agilent E4991A za pomoci zařízení 16453A a přídatných zařízení pro měření fólií a plošných textilií dielektrické vlastnosti folie nebo plošné textilie. Postup je znázorněn diagramem na obr. 4.4.

- 1. Příprava pro měření:** před měřením si připravíme vzorky materiálu který budeme chtít měřit. Vzorky musí splňovat minimální rozměry vzorků pro upínač a ty jsou uvedeny v kapitole 3.1. Šířka vzorku je pak omezena rozměry upínacího rámečku a to na 6,5 cm.
- 2. Volba měřicího módu:** musíme přenastavit měřicí mód z počátečního, tj. mód pro měření impedance, na mód měření dielektrických vlastností. Volte v menu přístroje:

Utility ► Materiál Option ► v políčku Matriál Type zvolíme Permittivity

- 3. Kalibrace:** před měřením je nutno provést kalibraci. Při kalibraci musí být na upínači nainstalována přídatná zařízení, která budeme používat při měření.

Stimulus ► Cal/Comp ► tlačítko Cal Menu ►

- tlačítko **Meas Short** - spustíme kalibraci nakrátko. Elektrody upínače se dotýkají. Když je kalibrace nakrátko skončena objeví se symbol „fajfka“ u levého kraje tlačítka. ►
- tlačítko **Meas Open** - pro spuštění otevřené kalibrace. Upínač musí být nastaven pro otevřenou kalibraci. Horní elektroda je zvednuta a zajištěna západkou (5) obr. 3.1.5. Dokončení kalibrace je nám oznámeno stejným způsobem jako u kalibrace nakrátko. ►
- tlačítko **Meas Load** - spustí kalibraci se standardní zátěží. Tou je destička PTFE (teflon), dodávaná s upínačem 16453A. Ta musí být vložena v upínacím rámečku a nasunuta mezi elektrody. Konec je oznámen opět známým způsobem ►
- tlačítko **Done** - vypočte a uloží kalibrační koeficient.

Dále nastavíme stupnici úchylkoměru na zařízení pro zajištění polohy horní elektrody na nulu při nulovém zdvihu horní elektrody.

4. Zadání tloušťky vzorku:

Utility ► Materiál Option Menu ►

do políčka **Thickness** zadejte tloušťku vzorku. Potvrďte entrem.

5. Vložení vzorku: vložíme vzorek do upínacího rámečku zajistíme šrouby a nasuneme mezi elektrody upínače. Horní elektroda musí být zdvižena výše než je tloušťka měřeného vzorku, aby nedošlo k jeho shrnutí.

6. Nastavení výšky horní elektrody: regulačním šroubem (1) obr. 4.2. nastavíme výšku horní elektrody na požadovanou hodnotu.

7. Nastavení parametrů měření: nastavíme podmínky měření.

Nastavení rozsahu rozmítání (frekvence):

Stimulus ► Start/Stop ►

bud'

- políčko **Start** - zadejte frekvenci od které chcete měřit, min. 1 MHz.
- políčko **Stop** - zadejte frekvenci do které chcete měřit max. 3 GHz (pro zařízení 16453A platí omezení do 1 GHz, lze měřit do 3GHz, dochází však vlivem elektrické délky k fázovému posuvu).

nebo

- políčko **Centr** - zadejte prostřední frekvenci rozsahu rozmítání.
- políčko **Span** - zadejte rozsah rozmítání.

Nastavení parametrů rozmítání:

Stimulus ► Sweep Setup ►

- políčko **Numer Of Points** - počet bodů rozmítání, 2 – 801 bodů.
Přednastaveno: 201 bodů.
- Políčko **Sweep Type** – nastaví typ rozmítání **Linear/Log**,
lineární/logaritmické.

Nastavení parametrů zdroje budícího elektrického pole:

Stimulus ► Source ►

Nastavení průměrování naměřených hodnot: agilent E4991A zvládá dva typy průměrování naměřených hodnot.

1. **Průměrování v každém bodě měření:** střední hodnota se počítá podle vzorce:

$$M = \frac{1}{F} \sum_{n=1} S_n .$$

Kde: M -střední hodnota permitivity, F -celkový počet měření, S_n -naměřená hodnota při n -tém měření.

Stimulus ► Sweep Setup ► do políčka **Point Average** zadejte počet měření
 $F = 1-100$

2. **Průměrování z více bodů měření:** střední hodnota se počítá podle vzorce:

$$A_n = \frac{S_n}{F} + \left(1 - \frac{1}{F}\right) \times A_{n-1} .$$

Kde: A_n -střední hodnota n -tém bodě měření, F -počet bodů průměrování, S_n naměřená hodnota v n -tém bodě měření.

Meas/Format ► Meas/Format ►
tlačítkem **Sweep Average** zapněte průměrování ►
do políčka **Swp Avg Count** zadejte počet bodů průměrování 1 - 999

8. Měření:

Trigger ►

- A) **Hold** - zastaví probíhající měření.
- B) **Continous** - měření se stále opakuje.
- C) **Single** - jedno měření.

9. Analýza nebo uložení výsledků:

- Pro vhodné zobrazení výsledků na displeji přístroje, bude pravděpodobně nutno použít funkci automatické měřítka. Ta upraví měřítka os grafů pro optimální zobrazení výsledků.

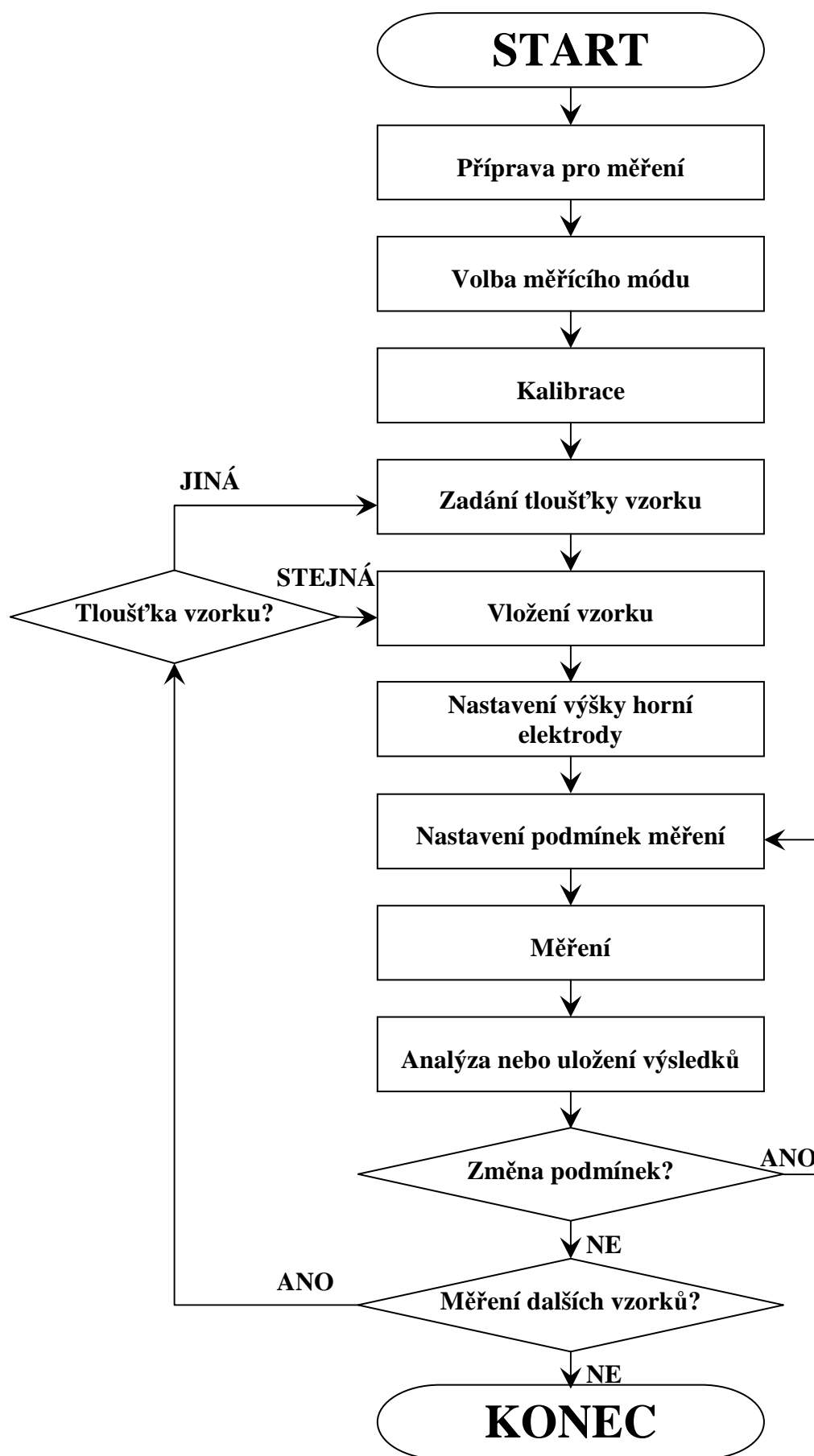
Scale ►

- A) **Autoscale All** - použije automatické měřítka pro všechny křivky.
- B) **Autoscale** - použije automatické měřítka pouze na vybranou stopu.
Stopu vybereme kliknutím na název měřeného parametru nad grafem.

- Pro podrobnější analýzu naměřených dat přímo v přístroji můžeme použít dalších funkcí přístroje určených pro analýzu dat. Tato problematika je podrobně zpracována v manuálu přístroje [8].
- Chceme-li se k naměřeným datům někdy vrátit, nutno je uložit.

Save/Recall ►

- A) Save State** - uloží binární soubor (*.sta). Uloží nastavení podmínek měření a údaje o kalibraci přístroje. Načtením souboru v přístroji se přístroj nastaví na stejné podmínky jako při ukládání měření.
- B) Save Data** – zde máme tři možnosti.
- a. Binární soubor (*.dat)** – uloží pole naměřených dat. Ty je možno na přístroji opětovně načíst.
 - b. ASCII (*.txt)** – uloží pole naměřených dat do textového souboru. Tento typ souboru je vhodný pro zpracování dat v softwaru pro PC.
 - c. CITIfile (*.txt)** – uloží naměřená data do textového souboru ve formátu CITIfile.
- C) Save Graphics** - uloží graf zobrazený na displeji podle výběru buď ve formátu bitmap (*.bpm) nebo jpeg (*.jpg).



Obr. 4.4 Postup měření fólií a plošných textilií.

5. Komplexní permitivita plošných textilií

Komplexní permitivita byla změřena na 4 vzorcích plošných textilií. Jejich vlastnosti jsou uvedeny v tab. 5.1. Všechny vzorky byly měřeny za stejných podmínek, na třech různých místech. Z těchto hodnot byl vypočten aritmetický průměr. Frekvenční charakteristiky komplexní permitivity všech vzorků jsou znázorněny v grafech 5a, b příloha č.1.

	vzorek1	vzorek2	vzorek3	vzorek4
Materiál	bavlna	bavlna	bavlna	bavlna
Vazba	kepr	plátno	plátno	plátno
Plošná hmotnost [kg.m⁻²]	0,2169	0,1502	0,1418	0,1391
Objemová hmotnost [kg.m⁻³]	429,505	408,650	449,841	400,288
Tloušťka [mm]	0,505	0,368	0,315	0,3475

Relativní komplexní permitivita pro $f = 1\text{MHz} - 1\text{GHz}$:				
Reálná složka ϵ_r' [-]	2,25 – 1,85	3 – 2,5	2,25 – 1,9	2,25 – 1,85
Imaginární složka ϵ_r'' [-]	0,1	0,1	0,1	0,1

Tab. 5.1 Vlastnosti měřených plošných textilií.

Na grafech je vidět, že průběh komplexní permitivity u všech vzorků je podobný. Liší se v podstatě pouze velikostí permitivity, a to nijak výrazně. Reálná složka permitivity se u vzorků pohybuje přibližně od $\epsilon_r' = 1,9$ do $\epsilon_r' = 3$. Chemické složení bavlny je stejné jako papíru (celulóza). V tabulkách udávaná hodnota relativní permitivity pro papír je $\epsilon = 3,5$ [10]. Vzhledem k tomu, že zaplnění plošných textilií je nižší, naměřené hodnoty permitivity jsou reálné.

Hodnoty imaginární složky komplexní permitivity jsou velmi nízké. Pohybují se kolem $\epsilon_r'' = 0,1$.

6. Možnosti zpracování dat z přístroje Agilent E4991A na PC

S naměřenými daty je možné pracovat přímo v přístroji, viz. operační manuál přístroje [8]. Druhou možností je naměřená data uložit do textového formátu, přenést na PC a využít pro jejich zpracování k tomu určený software. Např. Matlab, jak tomu bude v následujících příkladech, a kterého bylo pro zpracování dat a tvorbu grafů použito v této práci.

2D graf s logaritmickou osou x

Pro grafické znázornění výsledků měření bylo použito této jednoduché a však přehledné možnosti 2D grafu. Té ostatně využívá i přímo Agilent E4991A při zobrazování měření na displeji. Protože při měření bylo používáno logaritmického rozmítání, byla pro zobrazení hodnot použita logaritmická osa pro hodnoty frekvence i při tvorbě grafu. K vytvoření grafu sloužil v různých obměnách tento skript:

```
figure
plot(Ab(:,1),Ab(:,2))

hold on
plot(As(:,1),As(:,2),'r')

xlabel('f [Hz]')
ylabel('\epsilon''')
set(gca,'XScale','log')
xlim([1e+6 3e+9])

figure
plot(Bb(:,1),Bb(:,2))

hold on
plot(Bs(:,1),Bs(:,2),'r')

xlabel('f [Hz]')
ylabel('\epsilon''''')
set(gca,'XScale','log')
xlim([1e+6 3e+9])
```

pozn.: matice Ab - 1. sloupec frekvence
2. sloupec reálná složka komplexní permitivity měřená bez přípravku

- matice Bb - 1. sloupec frekvence
 2. sloupec imaginární složka komplexní permitivity měřená bez přípravku
- matice As - 1. sloupec frekvence
 2. sloupec reálná složka komplexní permitivity měřená s přípravkem
- matice Bs - 1. sloupec frekvence
 2. sloupec imaginární složka komplexní permitivity měřená s přípravkem

Tímto skriptem byly vytvořeny grafy: graf 4a, b příloha č.1.

3D graf

Této možnosti bylo použito pro znázornění reálné i imaginární složky komplexní permitivity do jednoho grafu. Při nastavení průhlednosti ploch pod křivkou se vyrušilo nastavení logaritmické osy x. To bylo řešeno kompromisem viz. graf 6 příloha č.1. , pro jehož vytvoření posloužil tento skript:

```
Q=size(A);
D=Q(1,1);
N(1:D,:)=0;
N2(1:D+2,:)=0;

Af=[1e6-1,0];
Af(2:D+1,:)=A;
Af(D+2,:)= [1e9+1,0];

figure
plot3(A(:,1),A(:,2),N,'k')
fill3(Af(:,1),Af(:,2),N2,'y')

hold on
plot3(B(:,1),N,B(:,2),'k')

xlabel('f [Hz]')
ylabel('\epsilon''')
zlabel('\epsilon"')
set(gca,'XScale','log')
xlim([1e+6 3e+9])
```

Pokud se spokojíme s lineární osu x pak by výsledek vypadal viz. graf7 příloha č.1. Pro menší frekvenční rozsah by takovýto graf vyhovoval. Tento graf byl vytvořen skriptem:

```
Q=size(A);
D=Q(1,1);
N(1:D,:)=0;
N2(1:D+2,:)=0;

Af=[1e6-1,0];
Af(2:D+1,:)=A;
Af(D+2,:)= [1e9+1,0];

Bf=[1e6-1,0];
Bf(2:D+1,:)=B;
Bf(D+2,:)= [1e9+1,0];

figure
plot3(A(:,1),A(:,2),N,'k')
fill3(Af(:,1),Af(:,2),N2,'y')
alpha(0.5)

hold on
plot3(B(:,1),N,B(:,2),'k')
fill3(Bf(:,1),N2,Bf(:,2),'b')
alpha(0.5)

xlabel('f [Hz]')
ylabel('\epsilon''')
zlabel('\epsilon"')
set(gcf, 'Renderer','OpenGL')
xlim([1e+7 3e+9])
```

pozn.: matice A - 1. sloupec frekvence

2. sloupec reálná složka komplexní permitivity

matice B - 1. sloupec frekvence

2. sloupec imaginární složka komplexní permitivity

7. Závěr

Přístroj, který je primárně určen pro měření komplexní permitivity tuhých homogenních materiálů, byl doplněn přídatným zařízením zohledňujícím specifické vlastnosti plošných textilií. Správnost výsledků měření s tímto přídatným zařízením byla ověřena na materiálu APC841 se známou hodnotou permitivity. Permitivita vzorku byla změřena s přídatnými zařízeními i bez nich. Vzájemné srovnání výsledků těchto měření a srovnání s hodnotami udávanými výrobcem bylo pozitivní. Permitivitu tedy lze měřit na takto upraveném přístroji.

Permitivita proměřených vzorků plošných textilií je velmi nízká. Zajímavé by bylo proměření plošných textilií zhotovených z jiných materiálů než je bavlna.

Pro srovnání výsledků změřené komplexní permitivity plošných textilií, by bylo vhodné použít i jiné metody měření. Vhodnou metodou by mohlo být umístění plošné textilie mezi dvě antény.

Seznam použité literatury

- [1] Halliday,D.; Resnick,R.; Walker,J.: Fyzika, VUTIUM, Brno 2000
- [2] Sedlák,B.; Štoll, I.: Elektřina a magnetismus, Academia, Praha, 2002
- [3] Richter,A.; Rydlo, P.: Hystereze dielektrických materiálů a její praktický význam, TUL, Liberec
- [4] Kitel,Ch.: Úvod do fyziky pevných látek, Academia, Praha, 1985
- [5] Haňka,L. : Teorie elektromagnetického pole, SNTL, Praha 1975
- [6] <http://www.piezoceram.com/>
- [7] <http://www.americanpiezo.com/>
- [8] Agilent E4991A RF Impedance/Materiál Analyzer, Operační manuál
- [9] Kovačič,V.: Textilní zkušebnictví II, TUL, Liberec
- [10] <http://en.wikipedia.org/>

Seznam příloh

Příloha č. 1: Grafy

Příloha č. 2: Dokumentace k přídavnému zařízení

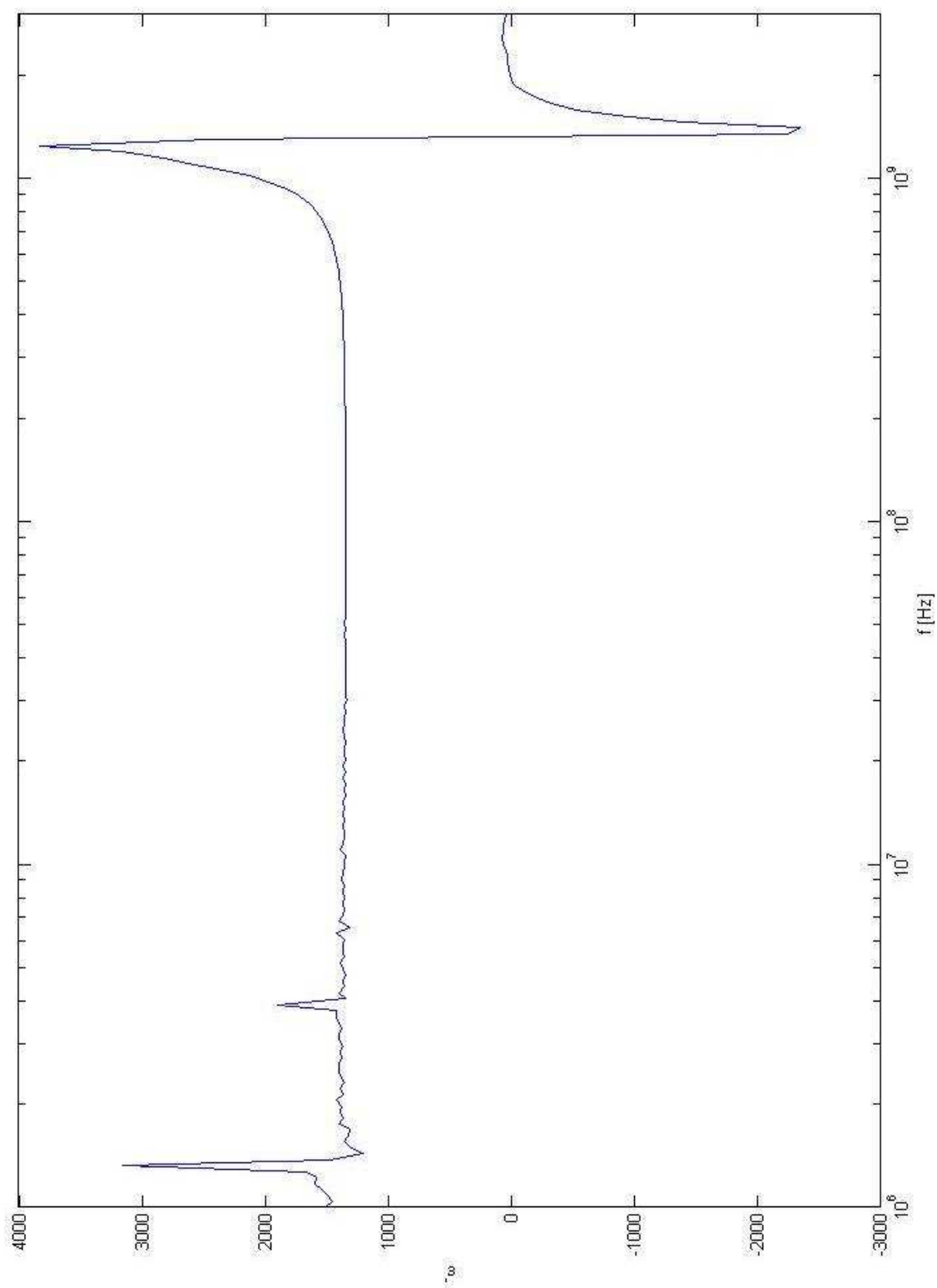
Příloha č. 3: Dokumentace k přídavnému zařízení soubory programu Solid Works

- pouze na přiloženém CD

Příloha č. 1: Grafy

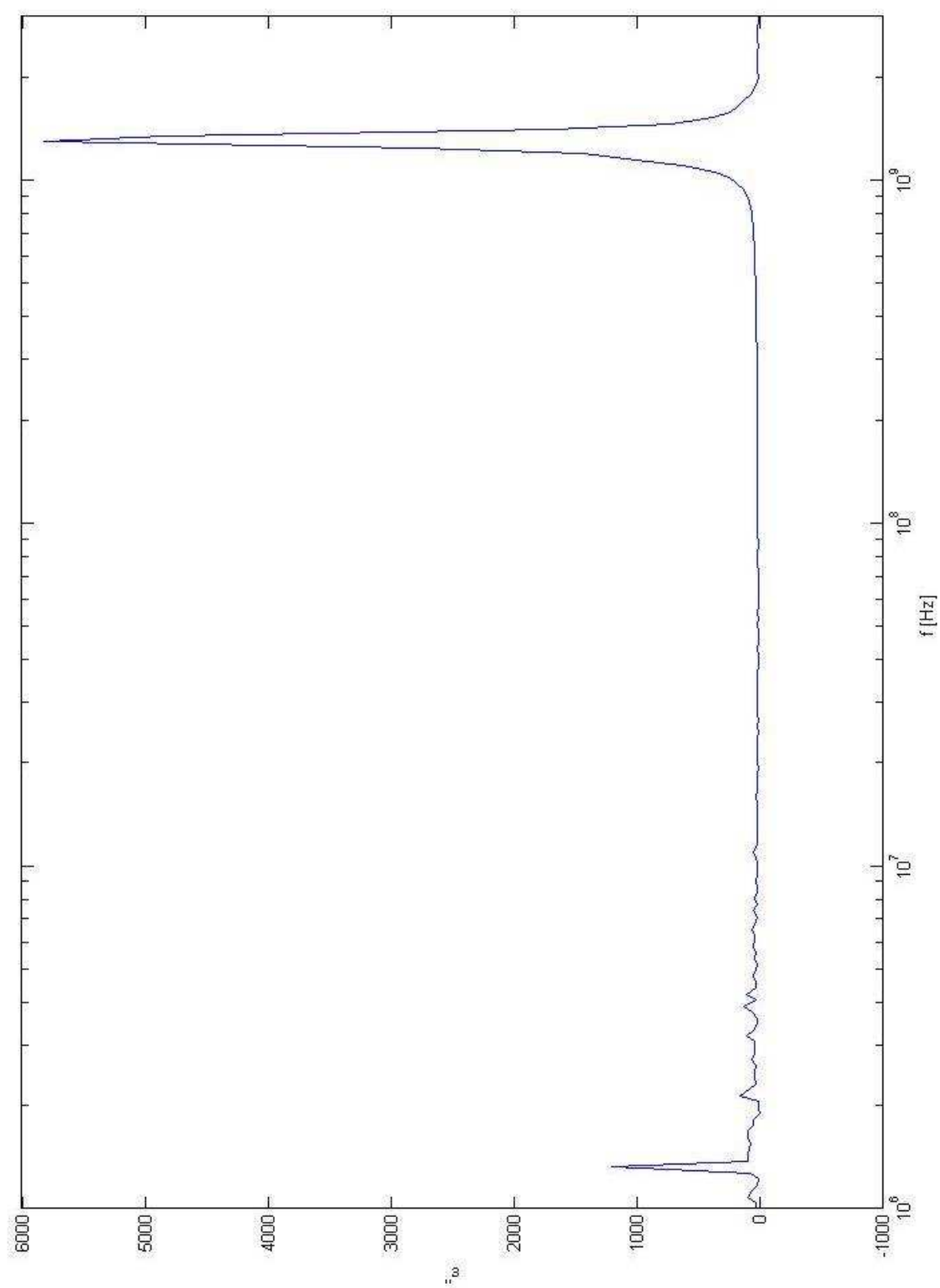
Graf 1a:

Reálná složka komplexní permitivity ε_r' piezokeramiky APC841



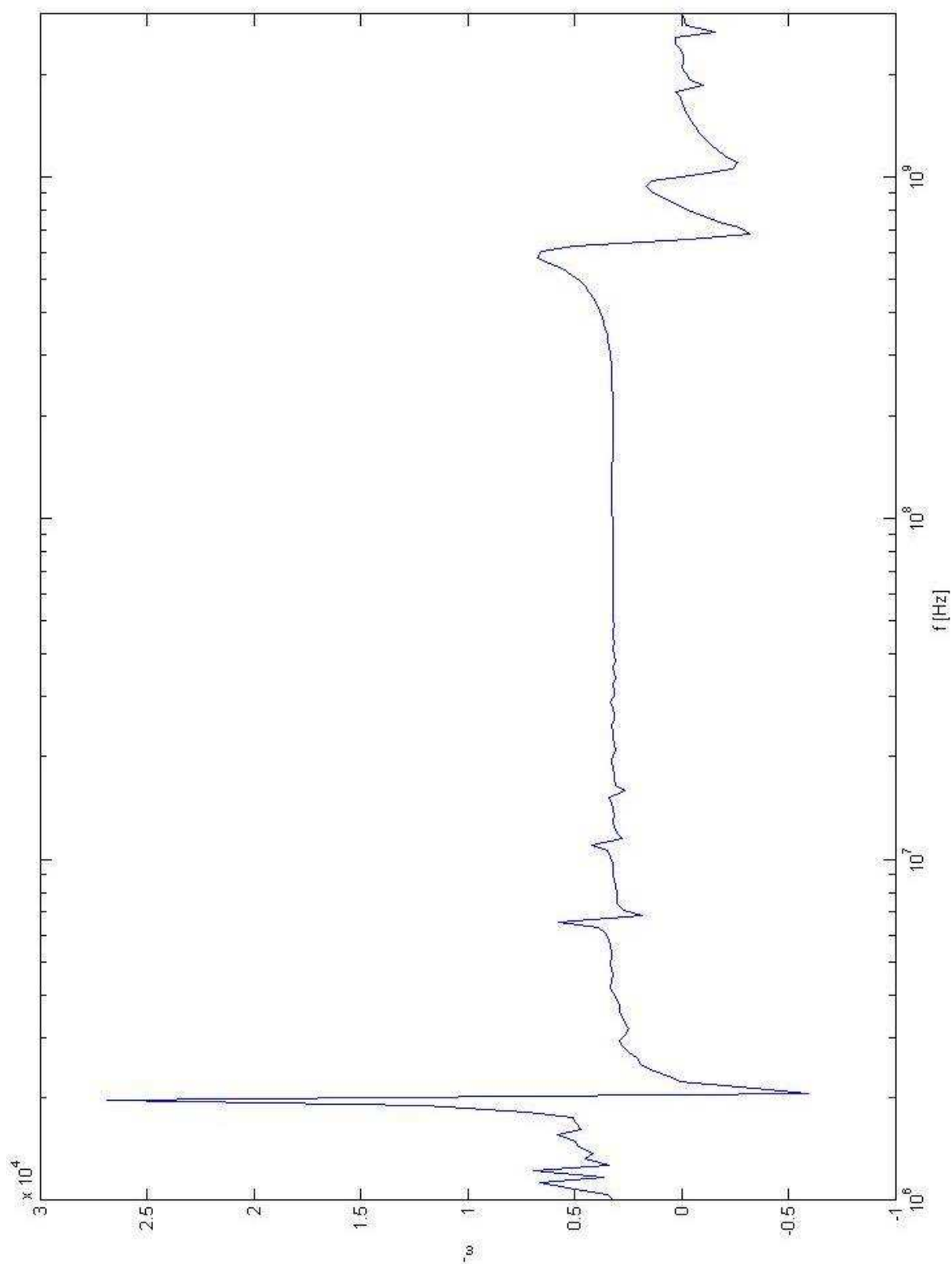
Graf 1b:

Imaginární složka komplexní permitivity ε_r'' piezokeramiky PCM51



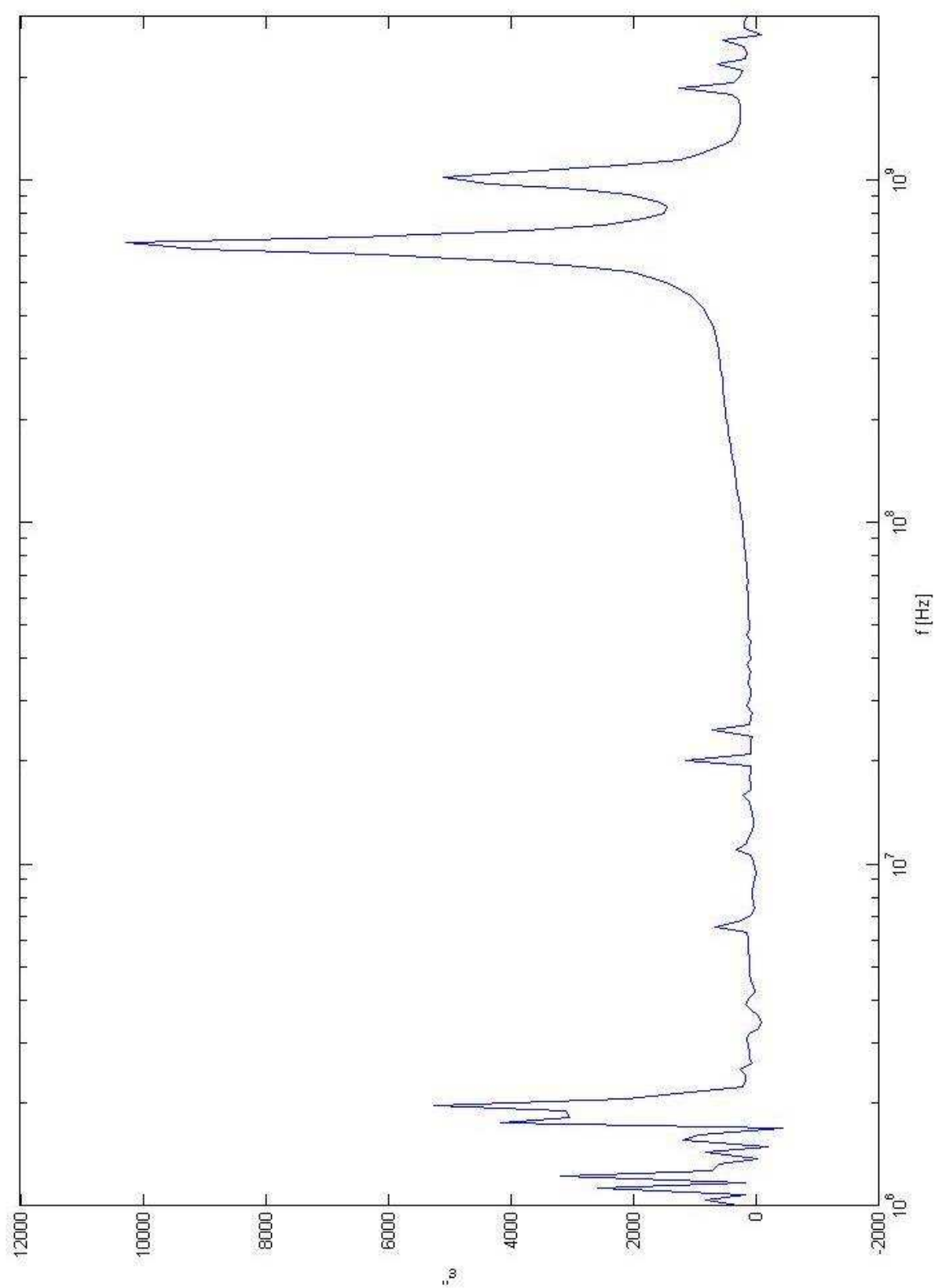
Graf 2a:

Reálná složka komplexní permitivity ε_r' piezokeramiky PCM51



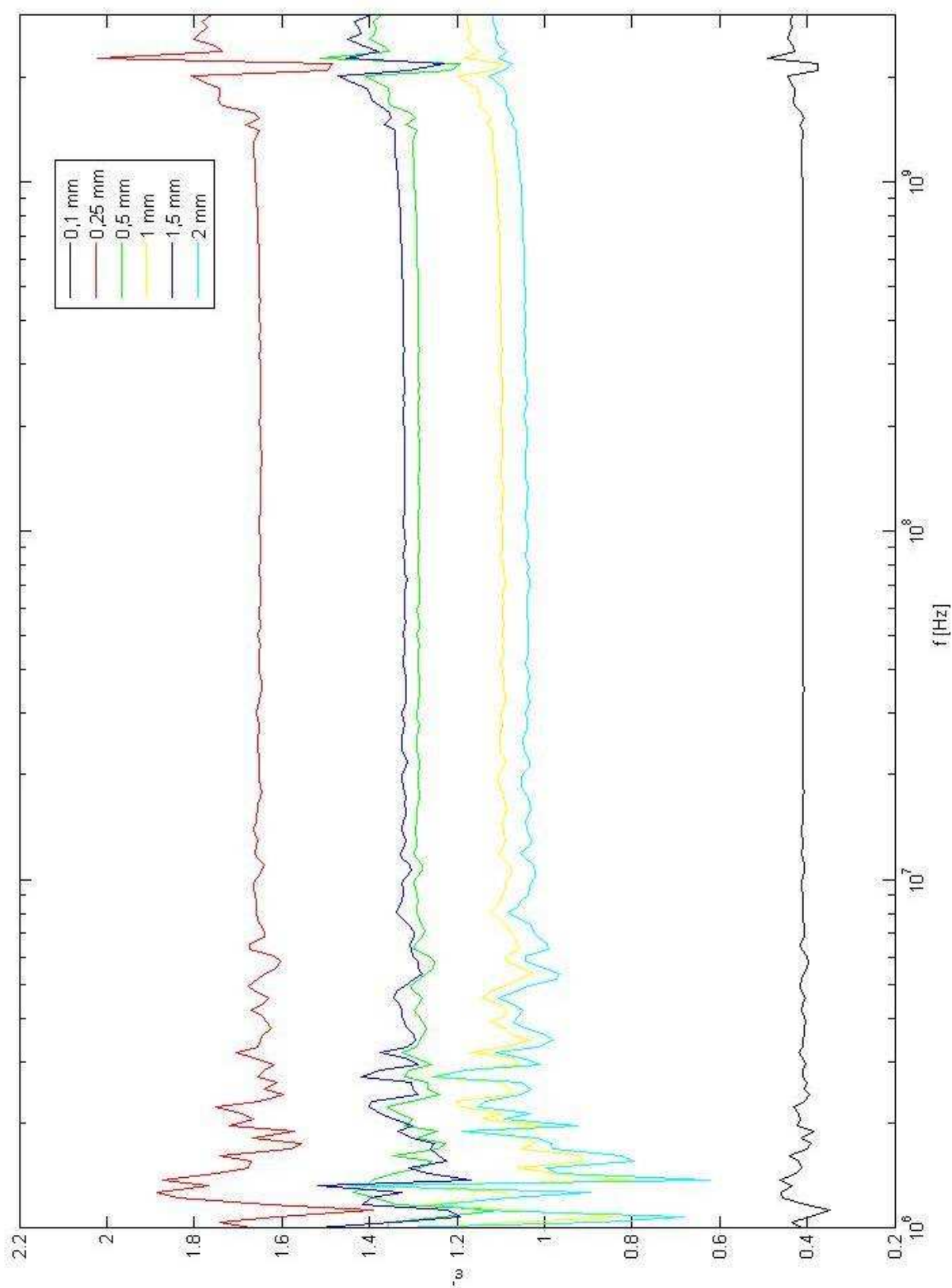
Graf 2b:

Imaginární složka komplexní permitivity ε_r'' piezokeramiky PCM51



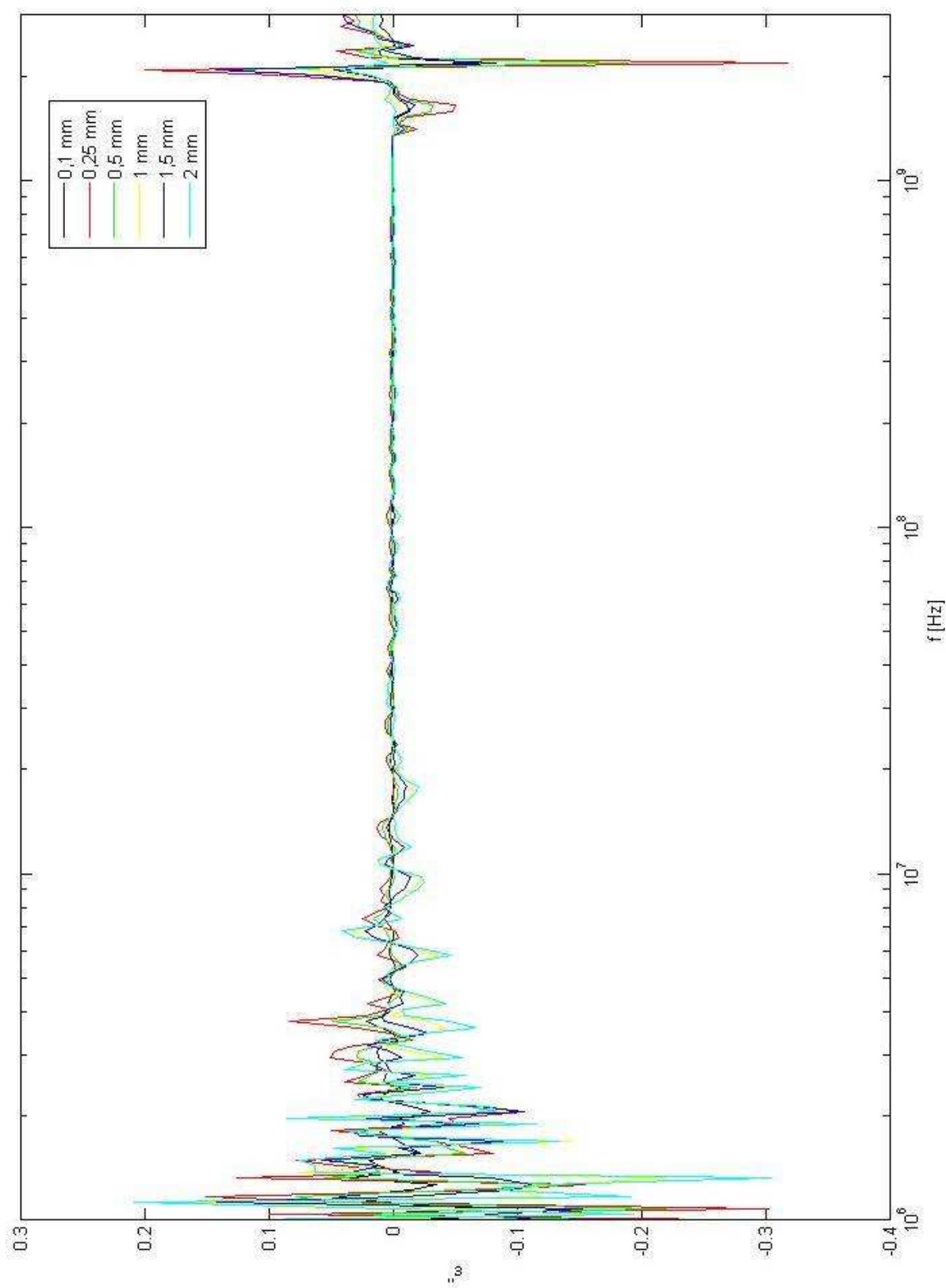
Graf 3a:

Reálná složka komplexní permitivity ϵ_r' při různě nastavené vzdálenosti elektrod



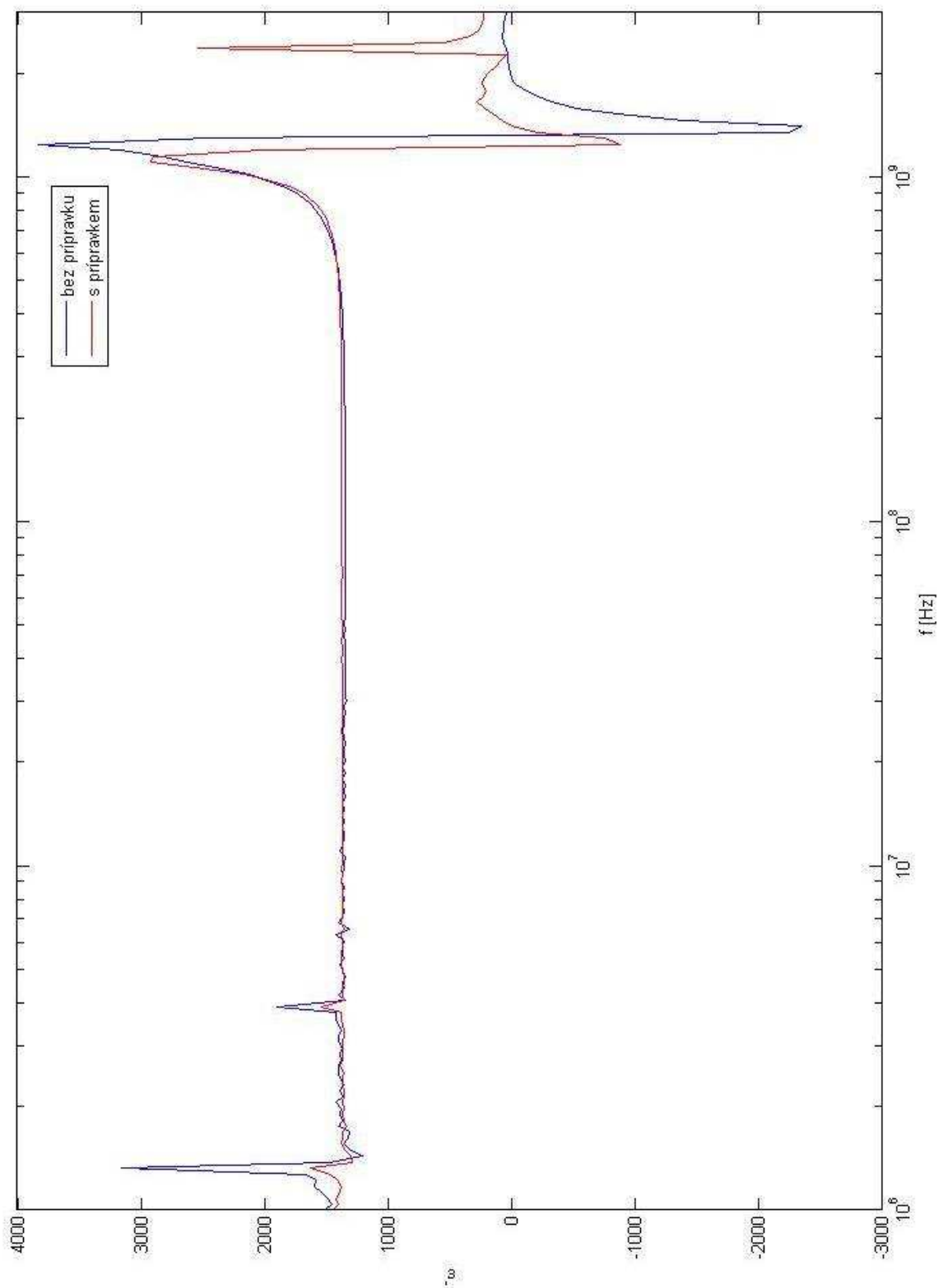
Graf 3b:

Imaginární složka komplexní permitivity ε_r'' při různě nastavené vzdálenosti elektrod



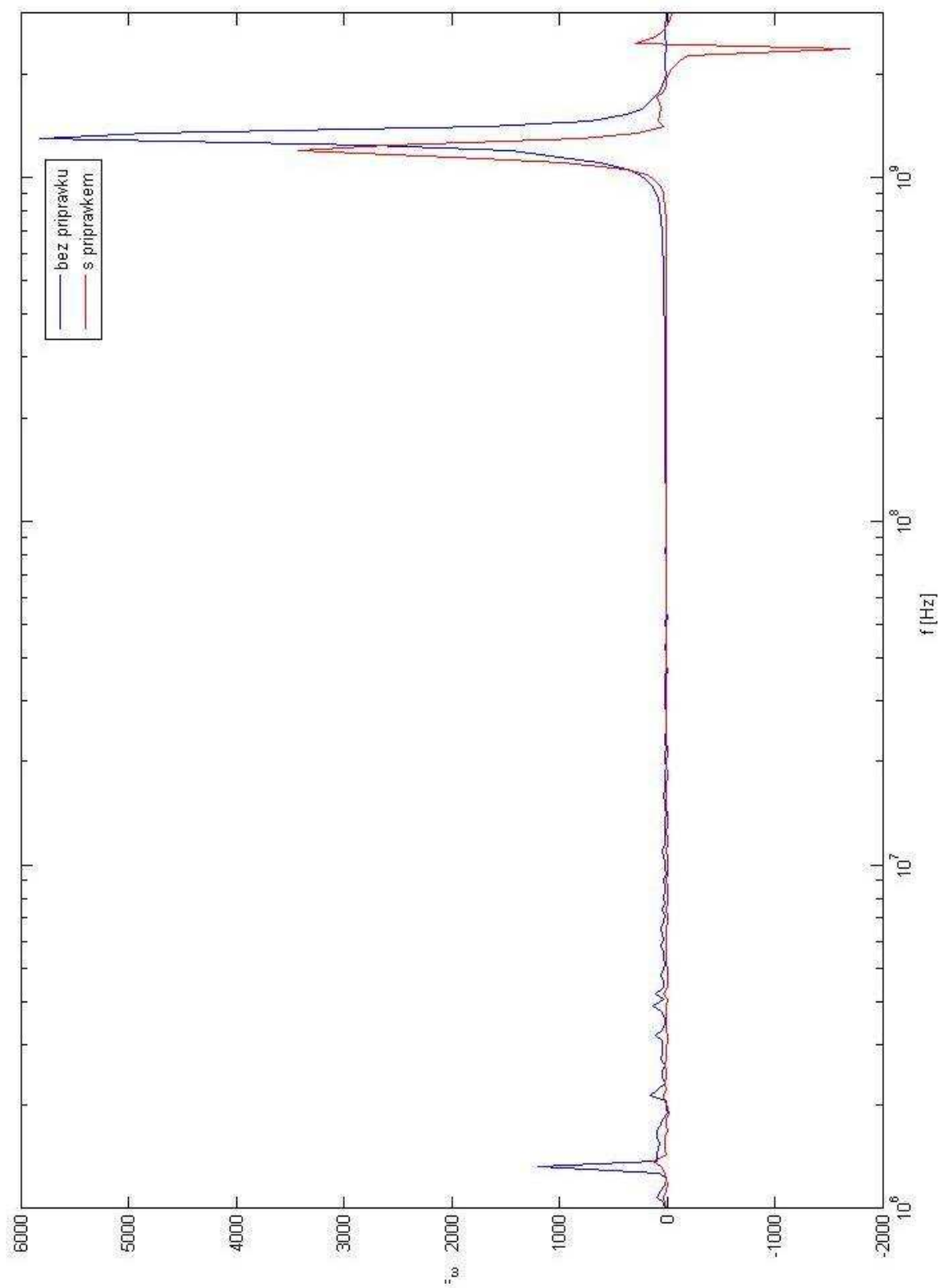
Graf 4a:

Srovnání naměřených hodnot s přípravkem a bez přípravku, reálná složka komplexní permitivity ε_r' piezokeramika APC841



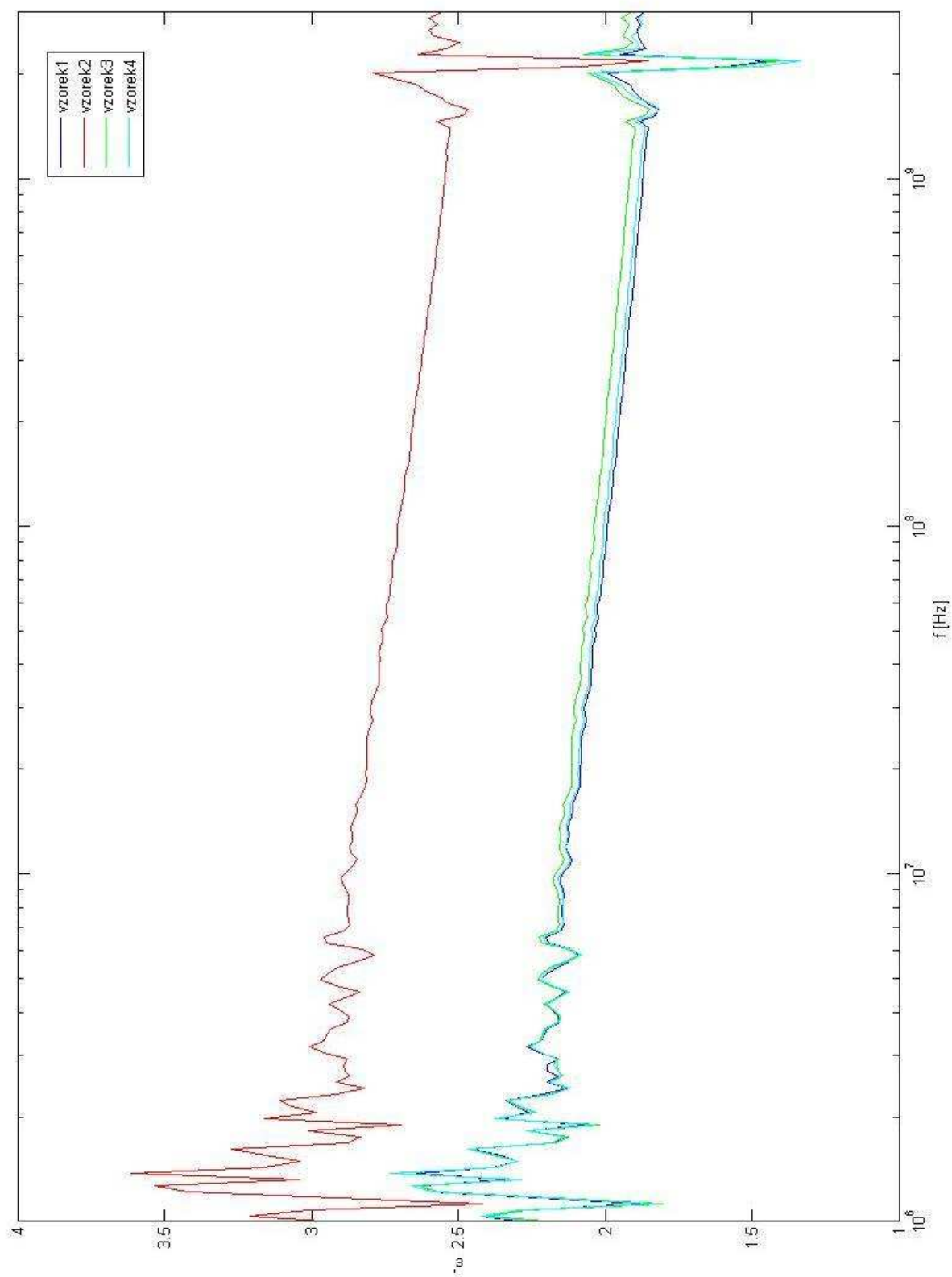
Graf 4b:

Srovnání naměřených hodnot s přípravkem a bez přípravku, imaginární složka komplexní permitivity ε_r'' piezokeramika APC841



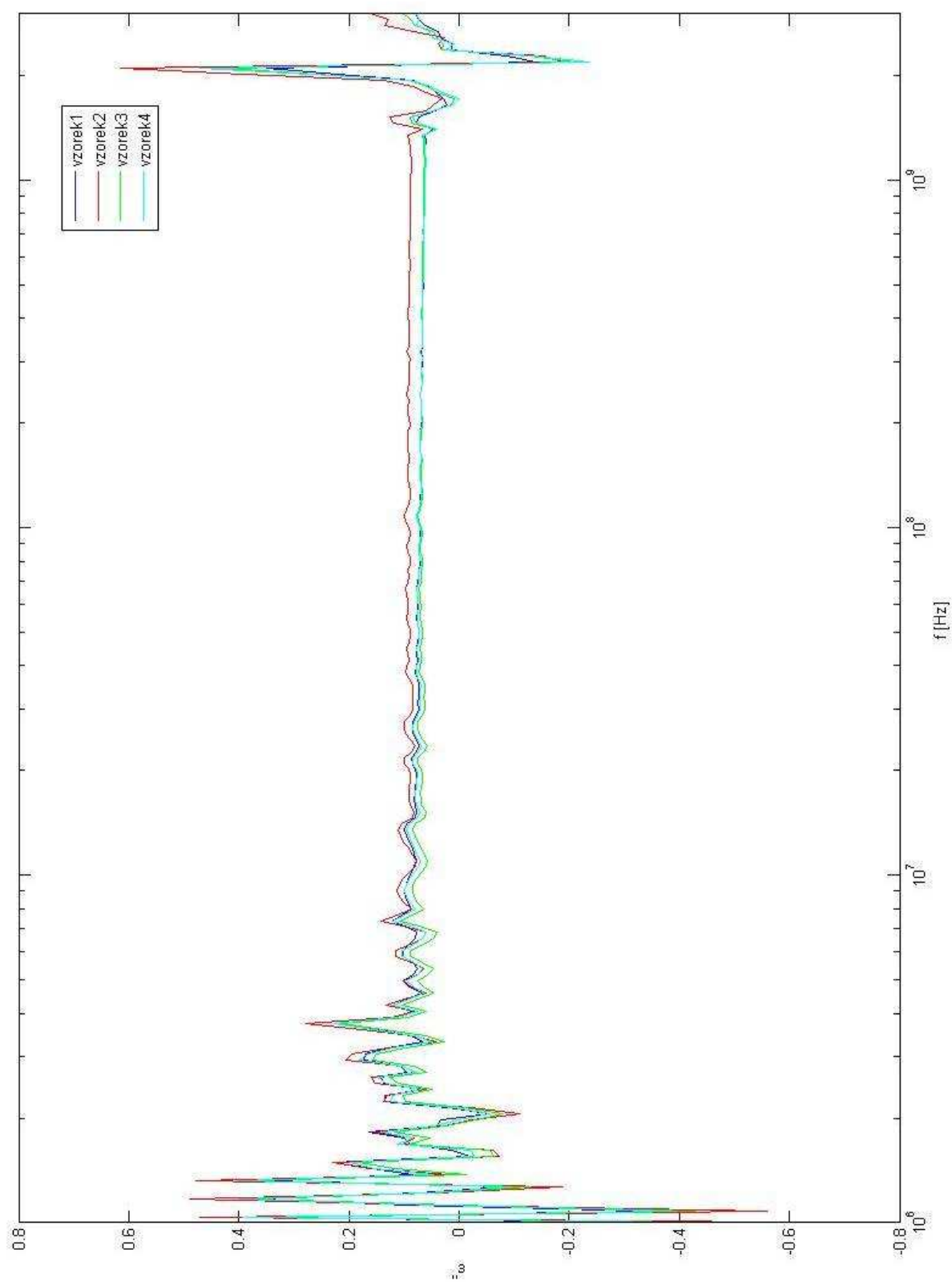
Graf 5a:

Reálná složka komplexní permitivity ϵ_r' textilních vzorků



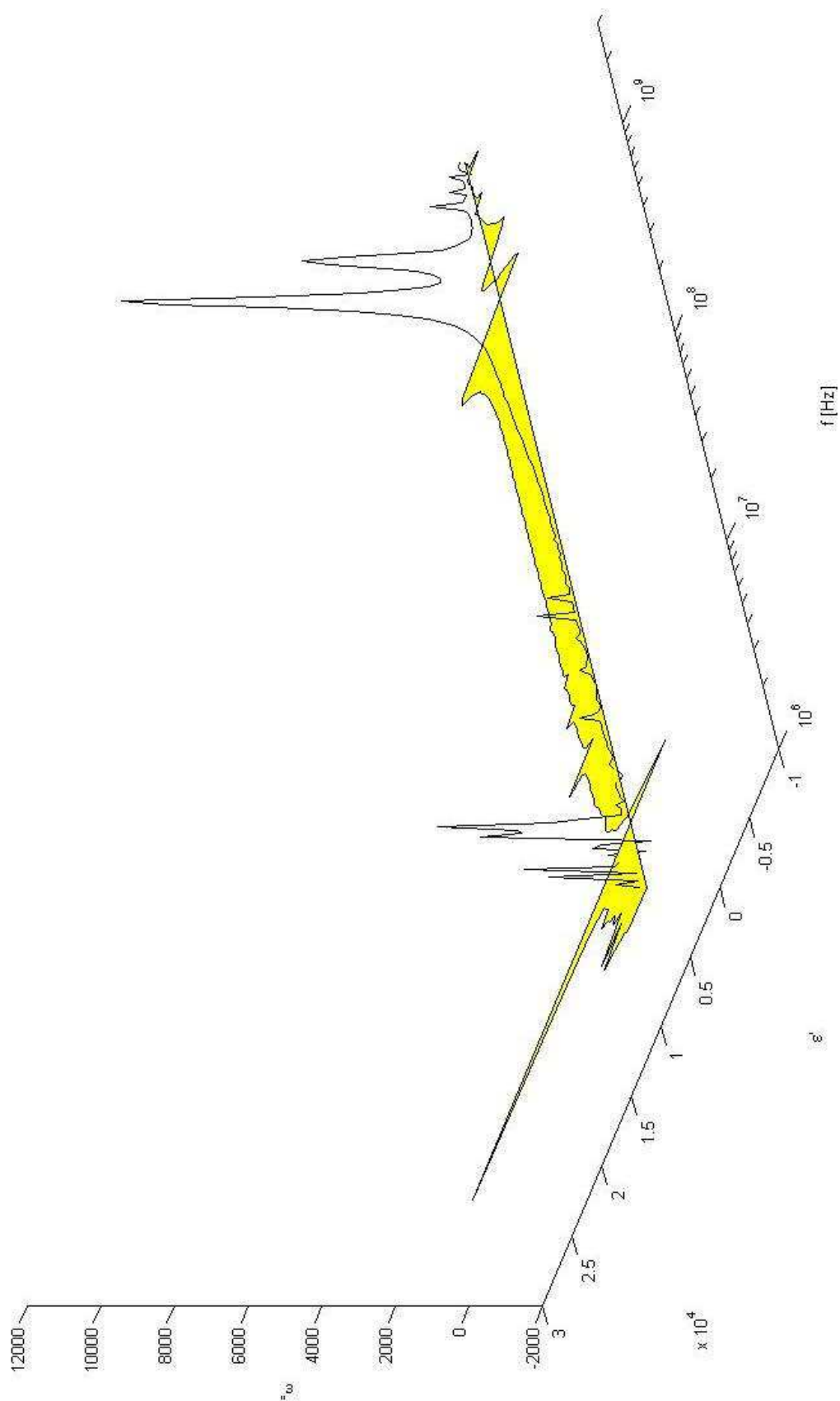
Graf 5b:

Imaginární složka komplexní permitivity ε_r'' textilních vzorků



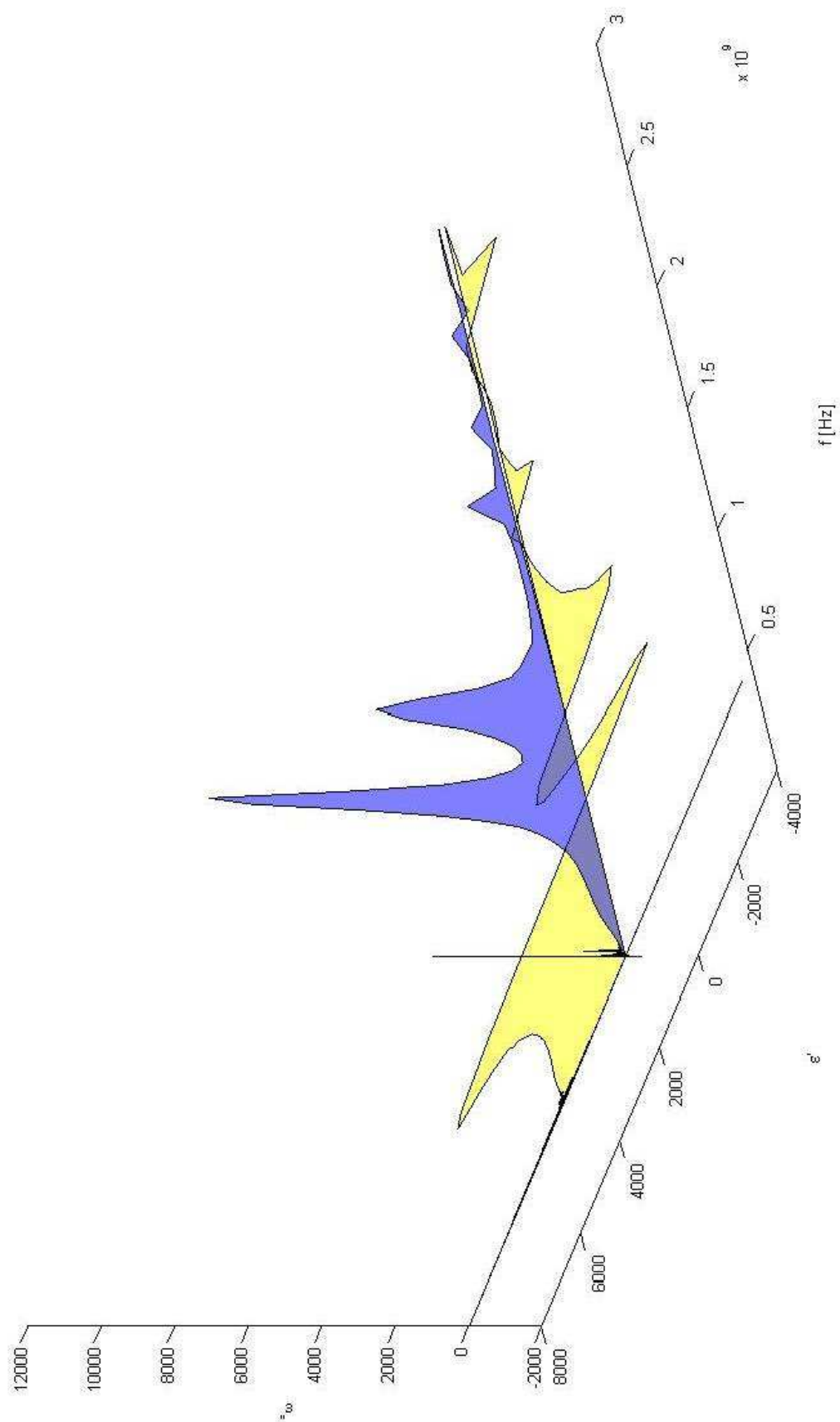
Graf 6:

Zobrazení obou složek komplexní permitivity piezokeramiky PCM51 v jednom 3D grafu



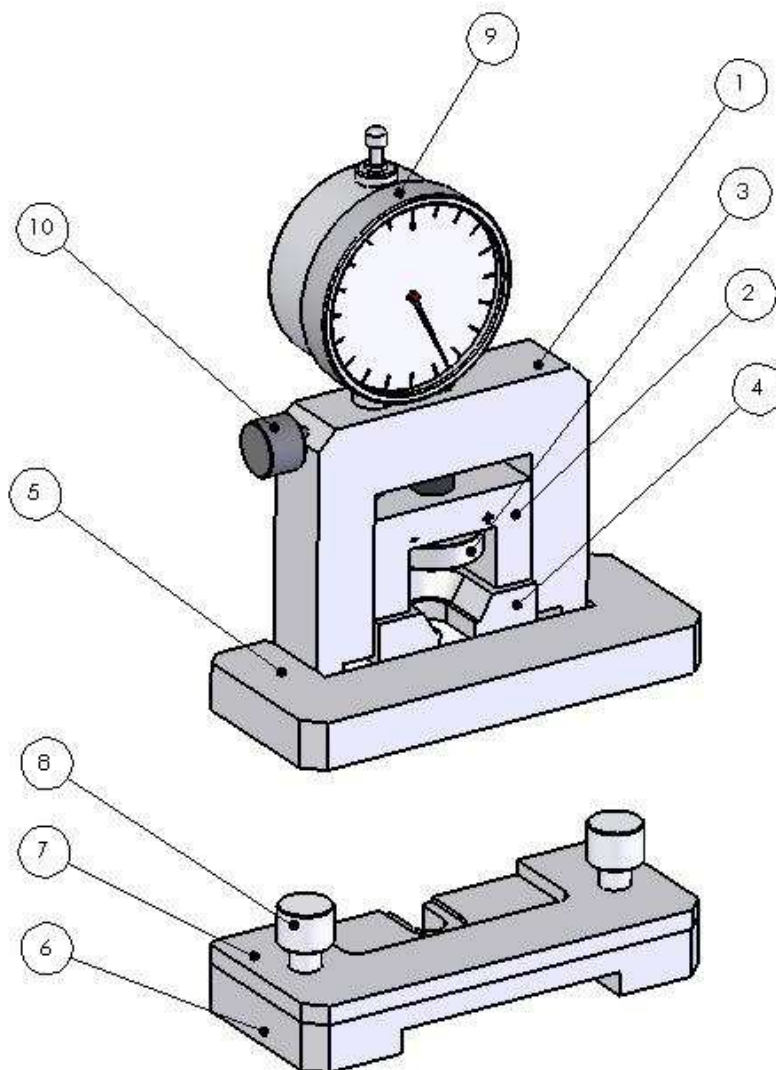
Graf 7:

3D graf komplexní permitivity piezokeramiky PCM51 s lineární osou



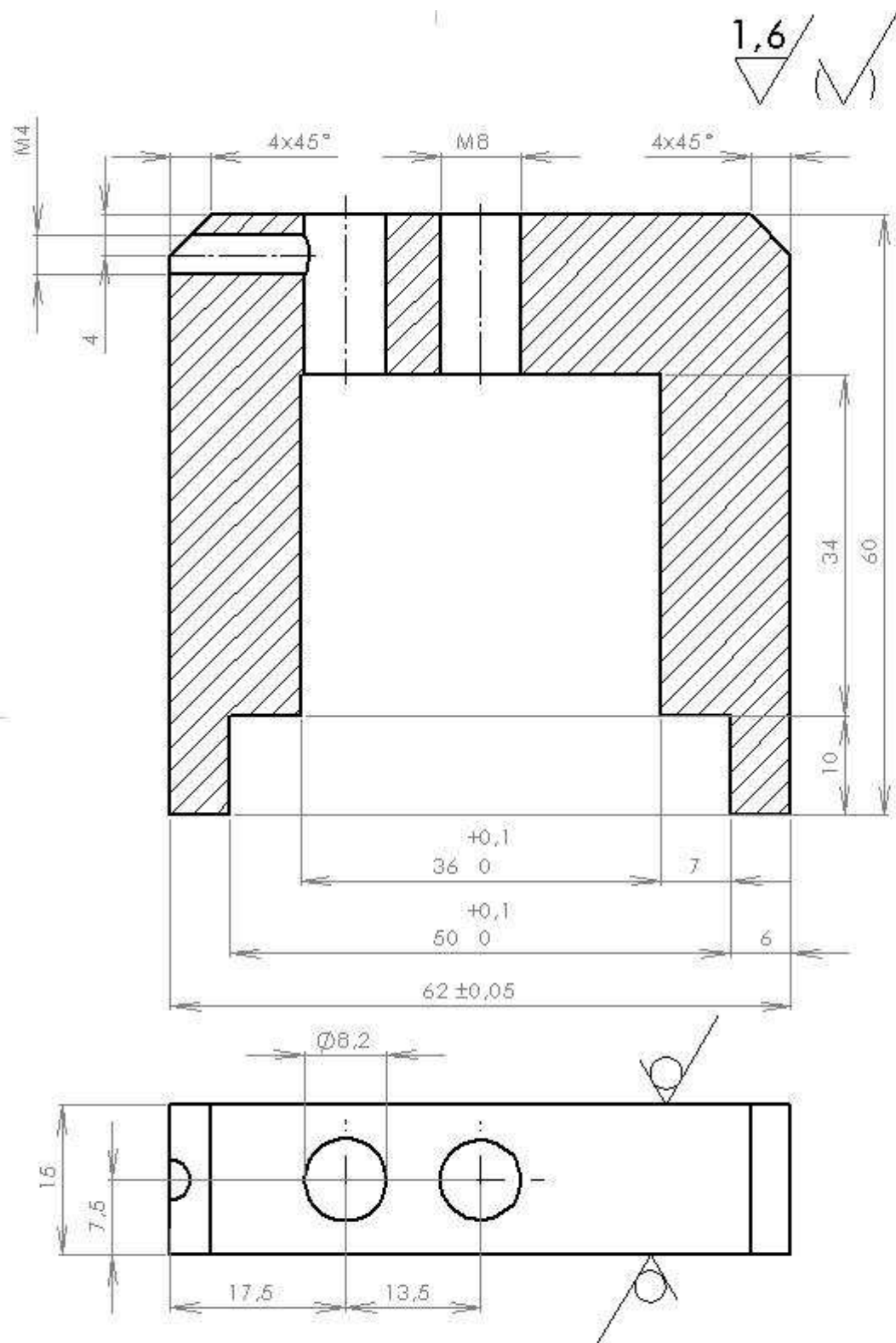
Příloha č. 2: Dokumentace k přídavnému zařízení

Sestava:

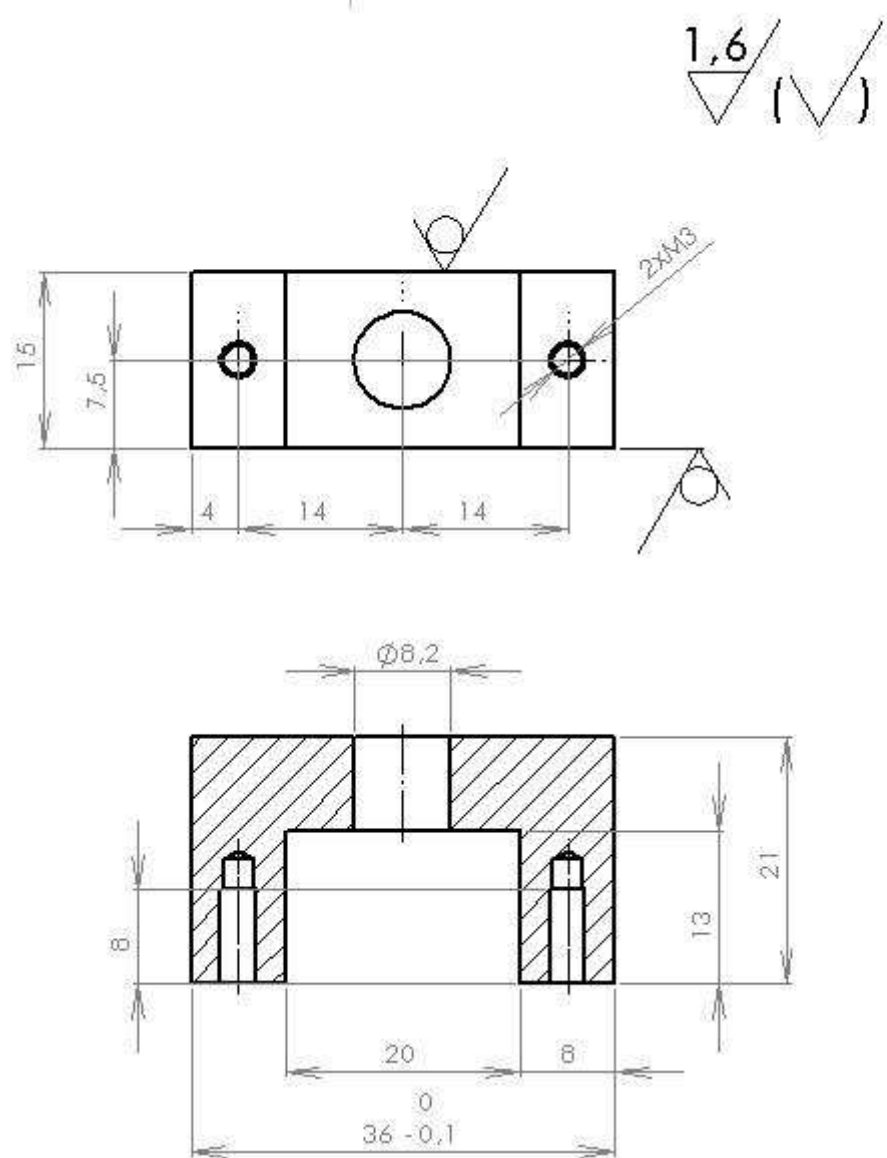


Číslo	Název dílu	Materiál	Kusů
1	Vzpěra	PMMA	1
2	Horní část jezdce	PMMA	1
3	Šroub pojezdu	PES	1
4	Spodní část jezdce	PMMA	1
5	Upevňovací díl	PMMA	1
6	Spodní část rámečku pro uchycení měřeného vzorku	PMMA	1
7	Horní část rámečku pro uchycení měřeného vzorku	PMMA	1
8	Šroub rámečku	PES	2
9	Úchylkoměr	PMMA	1
10	Šroub k uchycení úchylkoměru	PES	1

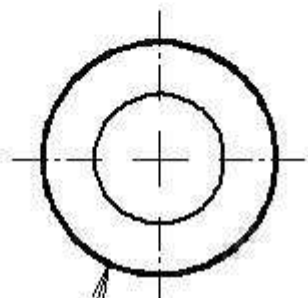
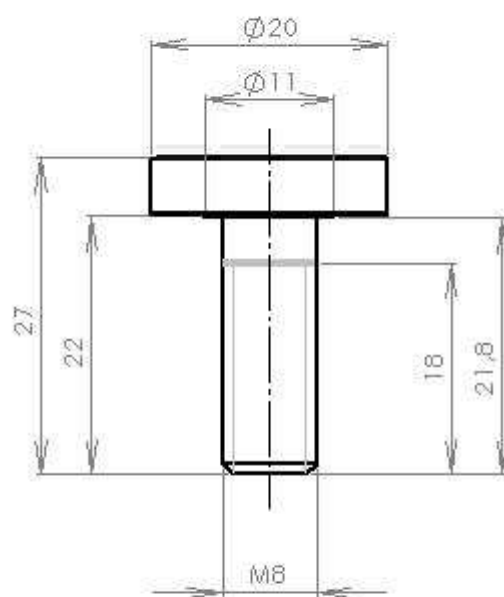
1 - Vzpěra



2 - Horní část jezdce

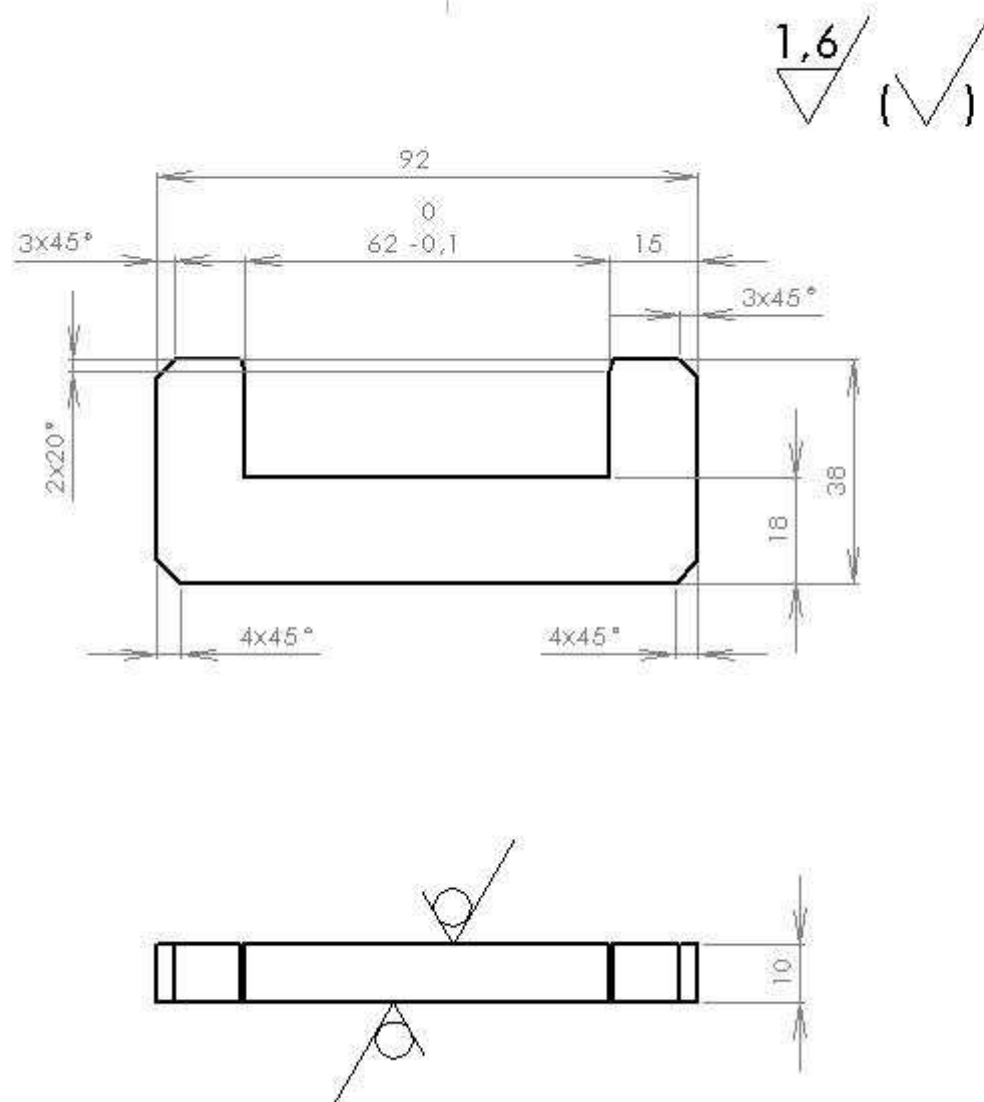


3 - Šroub pojezdu

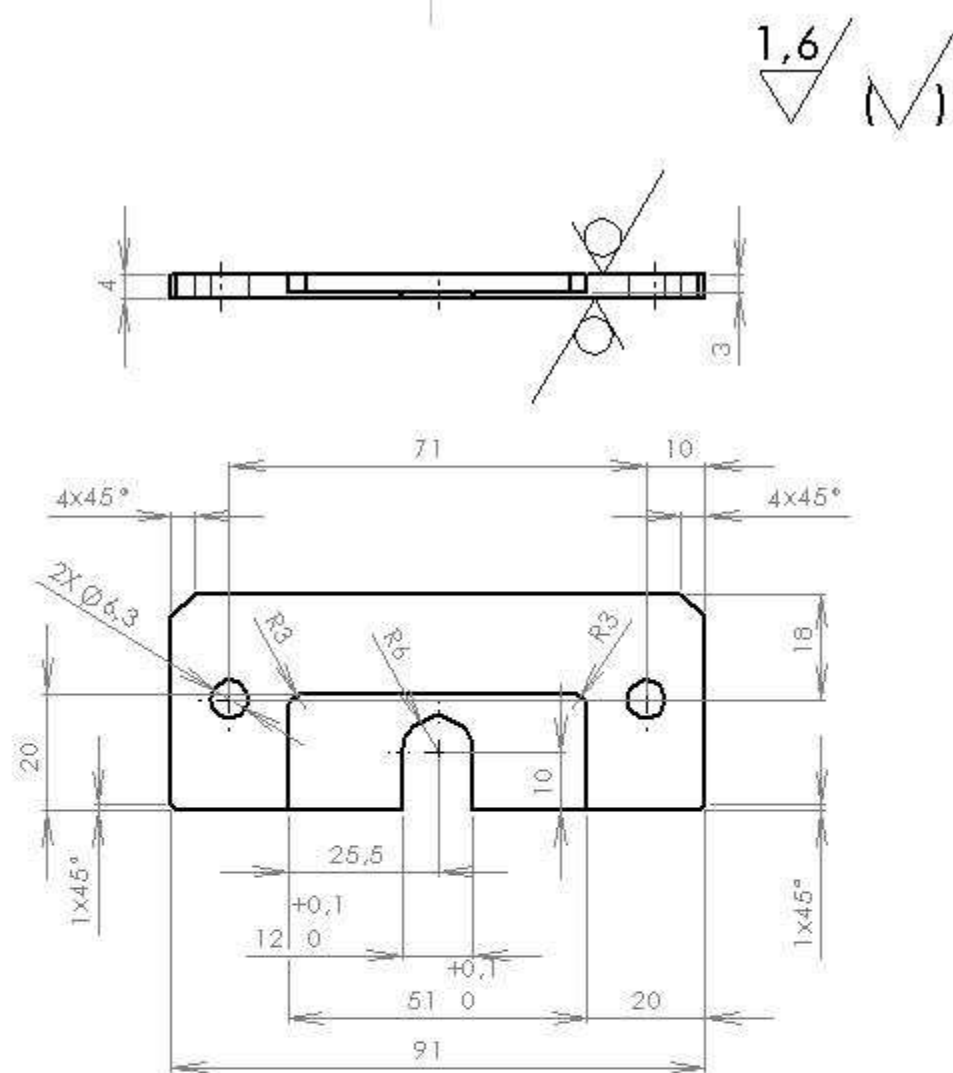


VROUBKOVÁNÍ PO OBVODU
SRAZIT HRANU 0,2x45°

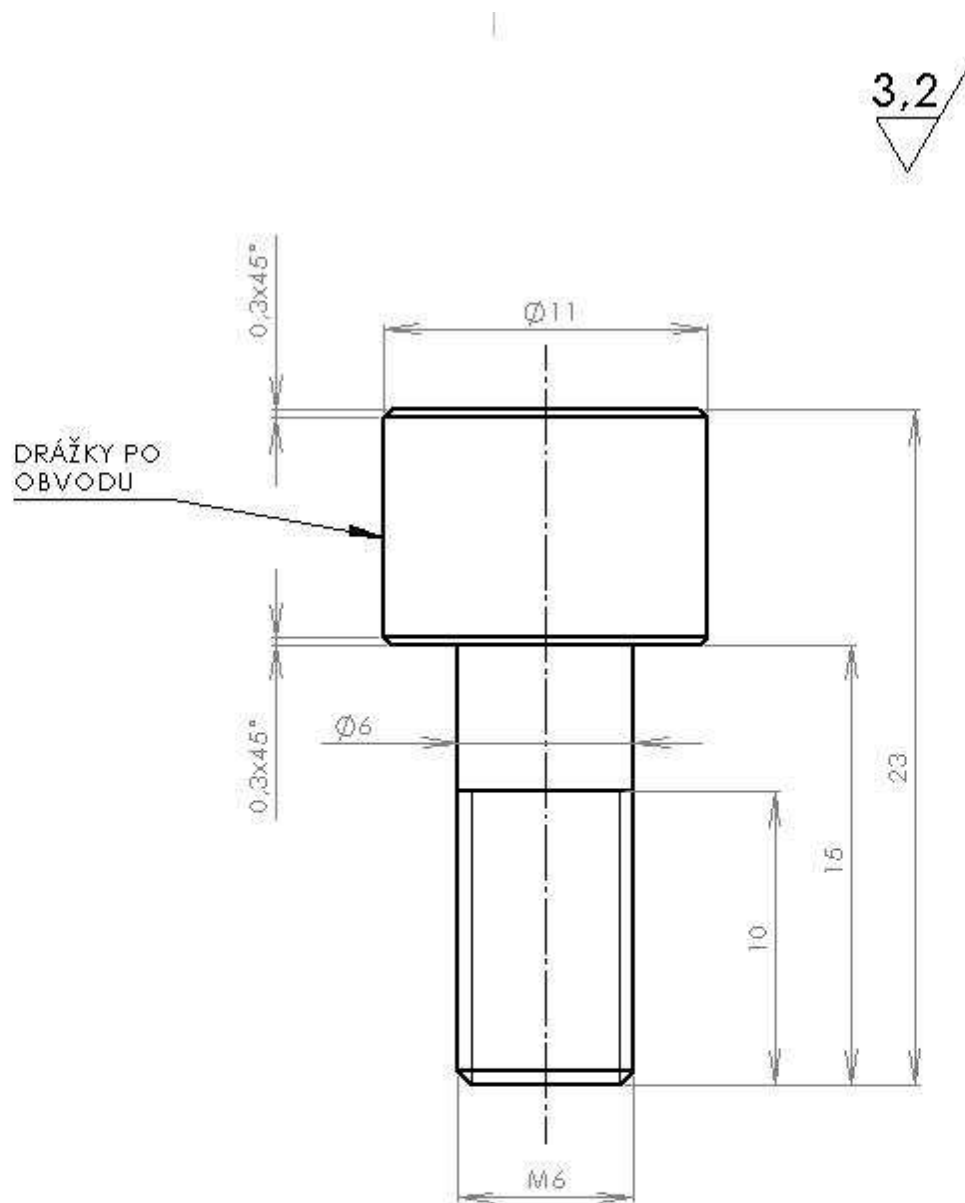
5 - Upevňovací díl



7 - Horní část rámečku pro uchycení měřeného vzorku



8 - Šroub rámečku



10 - Šroub k uchycení úchylkoměru

